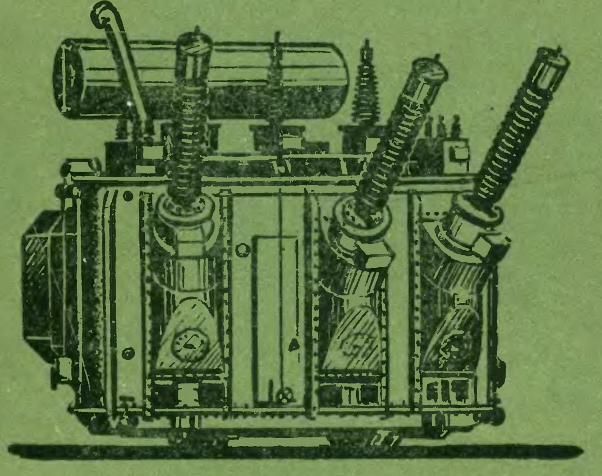
ТРАНСФОРМАТОРЫ



А. М. Дымков

Трансформаторы напряжения

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

ТРАНСФОРМАТОРЫ

Выпуск 10

А. М. ДЫМКОВ

ТРАНСФОРМАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1963 ЛЕНИНГРАД

СЕРИЯ «ТРАНСФОРМАТОРЫ»
под общей редакцией Б. Б. ГЕЛЬПЕРИНА и П. П. СКВОРЦОВА

ЭЭ-5(3)-3

В книге освещаются в сокращенном объеме область применения трансформаторов напряжения, технология их изготовления и условия эксплуатации.

Приведены наиболее часто используемые схемы включения трансформаторов напряжения.

Книга предназначена для среднего технического персонала, мастеров, квалифицированных рабочих, занимающихся производством, ремонтом и эксплуатацией трансформаторов напряжения.

621.314.222.08 *Дымков Александр Михайлович*
Д 69 **Трансформаторы напряжения,** М.—Л., Госэнергоиздат, 1963, 192 с. с черт. (в серии „Трансформаторы", вып. 10)

Редактор *М. А. Комар* Техн. редактор *Н. И. Борунов*

Сдано в набор 28/IV 1963 г. Подписано к печати 20/VII 1963 г.
Т-10014 Бумага 84×108 1/32 9,84 печ. л. Уч.-изд. л. 10,7
Тираж 19 000 экз. Цена 54 коп. Зак. 223

Типография № 1 Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Широкое развитие строительства мощных электрических станций, распределительных подстанций и переключательных пунктов, сооружение линий электропередач напряжением переменного тока до 500 *кв* включительно и, наконец, все возрастающий рост электрификации железных дорог с введением переменного тока высокого напряжения требуют установки большого количества измерительных трансформаторов напряжения переменного тока на различные классы напряжения, а в последнее время также и постоянного тока для линии постоянного тока высокого напряжения.

Трансформаторы напряжения необходимы на электрических станциях, распределительных подстанциях, заводских испытательных станциях и в лабораториях высокого напряжения, где они применяются в цепях переменного тока напряжением выше 220 *в*, для питания различных измерительных приборов и реле. В ряде случаев трансформаторы напряжения применяются и как силовые понижающие трансформаторы.

Материалом для составления книги явились конструкции выпускаемых и вновь разрабатываемых московским Электрозаводом имени В. В. Куйбышева [1] трансформаторов напряжения. Кроме обычных сухих и масляных трансформаторов переменного тока, в книге описаны новые типы трансформаторов напряжения — с литой изоляцией и емкостные, которые уже находятся в производстве на заводе.

В книге также описаны трансформаторы напряжения постоянного тока, проектируемые заводом для линии

[1] В дальнейшем завод будет именоваться сокращенно Электрозавод.

электропередачи постоянного тока Волжская ГЭС имени XXII съезда КПСС — Донбасс.

Настоящая книга содержит элементарную теорию, расчет, описание конструкций, технологию изготовления и испытания трансформаторов напряжения.

Книга рассчитана на широкий круг читателей, занимающихся вопросами проектирования или эксплуатации трансформаторов напряжения.

Глава 6 «Испытание трансформаторов напряжения» по просьбе автора написана Е. А. Кагановичем, за что автор приносит ему глубокую благодарность.

Автор считает также своим долгом принести искреннюю благодарность инж. П. П. Скворцому и канд. техн. наук Б. Б. Гельперину за ценные советы и тщательное редактирование рукописи.

Все замечания и пожелания по данной книге будут с благодарностью приняты автором и учтены им в дальнейшем.

Автор

ВВЕДЕНИЕ

Измерение напряжения электрического тока производится при помощи измерительных приборов вольтметров. Однако непосредственное включение этих приборов в электрическую сеть допускается при номинальном напряжении сети, не превышающем 500 *в*, и лишь в некоторых случаях, в частности на испытательных станциях, до 600 *в*.

При более высоком напряжении сети непосредственное включение приборов недопустимо как по условию изоляции прибора, так и по условию безопасности обслуживающего персонала. Приборы для непосредственного включения в сеть высокого напряжения получились бы слишком громоздкими из-за требующихся больших изоляционных расстояний, а при напряжении 35 *кв* и выше их изготовление вообще практически невозможно.

В связи с этим при высоких напряжениях измерительные приборы включаются через промежуточные измерительные трансформаторы, называемые трансформаторами напряжения.

Благодаря трансформаторам напряжения измерительные приборы оказываются изолированными от сети, что делает возможным применение стандартных приборов и расширяет пределы измеряемых ими напряжений.

В данной книге рассматриваются преимущественно трансформаторы напряжения переменного тока и лишь в § 22 дается описание трансформаторов напряжения постоянного тока.

В книге используются определения и терминология, принятые ГОСТ 1983-43 на трансформаторы напряжения (§ 1—8), который в дальнейшем будет именоваться сокращенно ГОСТ.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТРАНСФОРМАТОРАХ НАПРЯЖЕНИЯ

1. НАЗНАЧЕНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Трансформаторы напряжения предназначены для измерения напряжения, для питания цепей автоматики, сигнализации и релейной защиты линий электропередач от замыкания на землю.

Для первых трех случаев могут применяться двухобмоточные трансформаторы напряжения. В последнем случае, т. е. для защиты линии от замыкания на землю, трансформаторы, кроме основной вторичной, должны иметь еще дополнительную вторичную обмотку — они будут трехобмоточными.

2. КЛАССИФИКАЦИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Трансформаторы напряжения различаются:

а) по числу фаз — однофазные и трехфазные;

б) по числу обмоток — двухобмоточные и трехобмоточные;

в) по классу точности, т. е. по допускаемым значениям погрешностей (см. § 4);

г) по способу охлаждения — трансформаторы с масляным охлаждением (масляные), с естественным воздушным охлаждением (сухие и с литой изоляцией);

д) по роду установки — для внутренней или наружной установки.

Однофазные трансформаторы напряжения могут иметь либо только один, либо оба ввода первичной

(ВН) обмотки, изоляция которых соответствует полному рабочему напряжению. В зависимости от этого, такие трансформаторы иногда называются однополюсными или двухполюсными. У однополюсных трансформаторов один ввод первичной (ВН) обмотки во время работы соединяется с землей.

Однофазные трансформаторы изготовляются как по обычной схеме (рис. 1), так и по каскадной схеме первичной обмотки, как это показано на рис. 65.

Трехфазные трансформаторы выполняются трехстержневыми и пятистержневыми.

В сухих трансформаторах в последнее время часто стала применяться литая изоляция. Трансформаторы с литой изоляцией полностью или частично (одни обмотки) залиты компаундной массой или эпоксидной смолой. Такие трансформаторы при внутренней установке выгодно отличаются от масляных, имея меньшие вес и габаритные размеры и почти не требуя ухода в эксплуатации.

Рис. 1. Однофазный двухобмоточный трансформатор напряжения.

а — присоединение трансформатора напряжения к трехфазной сети для измерения напряжения; *1* — первичная обмотка (ВН — высшего напряжения); *2* — вторичная обмотка (НН — низшего напряжения); *3* — предохранители; *б* — расположение вводов на крышке однофазного трансформатора напряжения; *А* и *Х* — вводы ВН; *а* и *х* — вводы НН.

Масляное заполнение трансформаторов напряжения служит главным образом для изоляции обмоток от заземленных частей и для предохранения обмоток от увлажнения. Ввиду относительно малых потерь масляное охлаждение для этих трансформаторов в отличие от силовых трансформаторов имеет второстепенное значение.

Особенностью трансформаторов напряжения является их малая мощность при высоком напряжении первичной обмотки, т. е. трансформаторы напряжения являются маломощными понижающими трансформаторами,

имеющими почти всегда большой коэффициент трансформации.

Кроме того, как это будет показано ниже, трансформаторы напряжения должны обладать малым падением напряжения в первичной и вторичной обмотках, чтобы иметь возможно меньшие погрешности коэффициента трансформации («погрешность напряжения») и угла сдвига между векторами первичного и вторичного напряжений («угловая погрешность»).

3. НОМИНАЛЬНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ

Номинальными напряжениями первичной и вторичной обмоток $U_{1н}$ и $U_{2н}$ трансформатора напряжения согласно ГОСТ называются напряжения, указанные на щитке трансформатора, соответственно для каждой из его обмоток.

Номинальным напряжением трансформатора называется номинальное напряжение его первичной обмотки.

Номинальным коэффициентом трансформации трансформатора $K_н$ называется отношение номинального напряжения первичной обмотки $U_{1н}$ к номинальному напряжению вторичной обмотки $U_{2н}$.

Трансформаторы напряжения отечественного производства изготовляются со стороны ВН на все стандартные напряжения распределительных сетей: 0,38; 0,5; 3; 6; 10; 15; 35; 110; 150; 220; 330 и 500 *кв* (ГОСТ 721-62). Кроме того, по специальным техническим условиям трансформаторы напряжения изготовляются и на другие напряжения, например 13,8; 18 и 20 *кв* для включения на шины крупных генераторов, 27,5 *кв* для сетей электрифицированных железных дорог и 154 и 400 *кв* для существующих электрических сетей.

Однофазные трансформаторы напряжения, у которых один конец первичной (ВН) обмотки во время работы заземляется (однополюсные трансформаторы), изготовляются на соответствующие фазные напряжения, т. е. $6:\sqrt{3}$ *кв*; $10:\sqrt{3}$ *кв* и т. д.

На вторичной (НН) стороне трансформаторов напряжения согласно ГОСТ применяются напряжения 100; $100:\sqrt{3}$ и $100:3$ *в*, а в отдельных случаях 127 *в*.

4. КЛАССЫ ТОЧНОСТИ

Трансформаторы напряжения должны удовлетворять определенным классам точности, характеризуемым предельно допустимыми значениями погрешностей при различных значениях первичного напряжения и нагрузки.

Цифра, обозначающая класс точности, соответствует предельно допустимому значению погрешности напряжения трансформатора при определенных условиях (см. § 5).

Погрешность напряжения f_U трансформатора напряжения согласно ГОСТ определяется по формуле

$$f_U = \frac{K_н U_2 - U_1}{U_1} \cdot 100\%, \qquad (1)$$

где $K_н = \frac{U_{1н}}{U_{2н}}$ — номинальный коэффициент трансформации;

U_1 — напряжение, приложенное к вводам первичной обмотки;

U_2 — напряжение, измеренное на вводах вторичной обмотки.

Угловой погрешностью δ трансформатора напряжения называется выраженный в угловых минутах угол между вектором первичного напряжения и повернутым на 180° вектором вторичного напряжения. Угловая погрешность считается положительной, если вторичное напряжение опережает первичное, и отрицательной, если вторичное напряжение отстает от первичного.

Допускаемые согласно ГОСТ погрешности для различных классов точности приведены в табл. 1.

Таблица 1

Класс точности	Погрешность напряжения, %	Угловая погрешность, *мин*
0,2	±0,2	±10
0,5	±0,5	±20
1,0	±1,0	±40
3,0	±3,0	Не нормируется

Классу точности 0,2 должны удовлетворять лабораторные трансформаторы напряжения[1], а остальным

[1] В данной книге лабораторные трансформаторы напряжения не рассматриваются.

классам точности должны удовлетворять трансформаторы напряжения промышленного назначения, устанавливаемые в сетях, подстанциях и распределительных устройствах.

Трансформатор напряжения считается удовлетворяющим заданному классу точности, если его погрешности не превышают значений, указанных в табл. 1.

Согласно ГОСТ трансформаторы напряжения промышленного применения могут выпускаться только классов точности 1 и 3, а трансформаторы напряжения для счетчиков электроэнергии должны удовлетворять классу точности 0,5 (для более точного учета расхода электроэнергии).

5. НОМИНАЛЬНЫЕ МОЩНОСТИ

Номинальной мощностью трансформатора напряжения называется указанная на его щитке отдаваемая мощность, при которой погрешности при номинальном первичном напряжении не превысят величин, установленных для соответствующего класса точности, указанного на щитке трансформатора.

Номинальная мощность трансформатора напряжения зависит от класса точности, которому он должен удовлетворять. Чем выше класс точности данного трансформатора (т. е. чем меньше его погрешности), тем меньше номинальная мощность.

Значения мощностей трансформаторов отечественного производства в зависимости от класса точности для различных номинальных напряжений приведены в табл. 2. Эти значения соответствуют требованиям ГОСТ.

Трансформаторы напряжения согласно ГОСТ должны удовлетворять заданным классам точности при следующих условиях:

1) Изменение мощности, отдаваемой основной вторичной обмоткой, должно быть в пределах от

$$0{,}25\left(\frac{U_1}{U_{1н}}\right)^2 P_н \text{ до } \left(\frac{U_1}{U_{1н}}\right)^2 P_н,$$

где U_1 — напряжение сети; допустимые колебания этого напряжения находятся в пределах $\pm 10\%$;

$U_{1н}$ — номинальное напряжение трансформатора;

$P_н$ — номинальная мощность трансформатора.

Таблица 2

Тип трансформатора	Номинальное напряжение, *в*		Номинальная мощность, *ва*, для классов точности			Максимальная мощность, *ва*	Схема соединения обмоток	Испытательное напряжение, *кв*	
	ВН	НН	0,5	1	3			ВН	НН
НОС-0,5	380	100	25	40	100	200	1/1-12	6	2
НОС-0,5	500	100	25	40	100	200	1/1-12	6	2
ОСБ-0,2	220	127	—	40	100	200	1/1-12	2	2
ОСБ-0,2	380	127	—	40	100	200	1/1-12	2	2
ОСБ-0,2	500	127	—	40	100	200	1/1-12	2	2
НОСК-3	3 000	100	30	50	120	240	1/1-12	12	2
НОСК-6	6 000	100	50	80	200	400	1/1-12	12	2
НОМ-6	2 100	100	30	50	120	400	1/1-12	24	2
НОМ-6	3 000	100	30	50	120	400	1/1-12	24	2
НОМ-6	6 000	100	50	80	200	600	1/1-12	32	2
НОМ-10	10 000	100	80	150	320	720	1/1-12	42	2
НОМ-15	13 800	100	80	150	320	840	1/1-12	55	2
НОМ-15	15 000	100	80	150	320	840	1/1-12	55	2
НОМ-15	18 000	100	80	150	320	840	1/1-12	55	2
НОМ-35	35 000	100	150	250	600	1 200	1/1-12	95	2
ЗНОМ-15	$6\,000 : \sqrt{3}$	$100 : \sqrt{3}/100 : 3$	50	80	200	400	1/1-12	32	2
ЗНОМ-15	$10\,000 : \sqrt{3}$	$100 : \sqrt{3}/100 : 3$	80	150	320	640	1/1-12	42	2
ЗНОМ-15	$13\,800 : \sqrt{3}$	$100 : \sqrt{3}/100 : 3$	80	150	320	640	1/1-12	55	2
ЗНОМ-15	$15\,000 : \sqrt{3}$	$100 : \sqrt{3}/100 : 3$	80	150	320	640	1/1-12	55	2
ЗНОМ-15	$18\,000 : \sqrt{3}$	$100 : \sqrt{3}/100 : 3$	80	150	320	640	1/1-12	55	2
ЗНОМ-20	$20\,000 : \sqrt{3}$	$100 : \sqrt{3}/100 : 3$	80	150	320	640	1/1-12	65	2
ЗНОМ-35-54	$35\,000 : \sqrt{3}$	$100 : \sqrt{3}/100 : 3$	150	250	600	1 200	1/1-12	95	2
ЗНОМ-35-54	27 500	127—100*	150	250	600	2 200	1/1-12	70	2

* Для напряжения 100 *в* класс точности 0,5 не гарантируется.

Продолжение табл. 2

Тип трансформатора	Номинальное напряжение, *в*		Номинальная мощность, *ва*, для классов точности			Максимальная мощность, *ва*	Схема соединения обмоток	Испытательное напряжение, *кв*	
	ВН	НН	0,5	1	3			ВН	НН
НТС-0,5	380	100	50	80	200	400	Y/Y_0-12	6	2
НТС-0,5	500	100	50	80	200	400	Y/Y_0-12	6	2
НТМК-6-48	3 000	100	50	80	200	400	Y/Y_0-12	24	2
НТМК-6-48	6 000	100	80	150	320	640	Y/Y_0-12	32	2
НТМК-10	10 000	100	120	200	480	960	Y/Y_0-12	42	2
НТМИ-6	3 000	100/100 : 3	50	80	200	400	Y_0/Y_0-12	24	2
НТМИ-6	6 000	100/100 : 3	80	150	320	640	Y_0/Y_0-12	32	2
НТМИ-10	10 000	100/100 : 3	120	200	480	960	Y_0/Y_0-12	42	2
НТМИ-18	13 800	100/100 : 3	120	200	480	960	Y_0/Y_0-12	55	2
НТМИ-18	15 000	100/100 : 3	120	200	480	960	Y_0/Y_0-12	55	2
НТМИ-18	18 000	100/100 : 3	120	200	480	960	Y_0/Y_0-12	55	2
НКФ-110-57	$110\,000 : \sqrt{3}$	$100 : \sqrt{3}/100$	—	500	1 000	2 000	1/1-12	200	2
НКФ-110-58	$110\,000 : \sqrt{3}$	$100 : \sqrt{3}/100 : 3$	—	500	1 000	2 000	1/1-12	200	2
НКФ-220-58	$154\,000 : \sqrt{3}$	$100 : \sqrt{3}/100$	—	500	1 000	2 000	1/1-12	280	2
НКФ-220-58	$220\,000 : \sqrt{3}$	$100 : \sqrt{3}/100$	—	500	1 000	2 000	1/1-12	400	2
НКФ-330	$330\,000 : \sqrt{3}$	$100 : \sqrt{3}/100$	—	500	1 000	2 000	1/1-12	460	2
НКФ-400	$400\,000 : \sqrt{3}$	$100 : \sqrt{3}/100$	—	500	1 000	2 000	1/1-12	630	2
НКФ-500	$500\,000 : \sqrt{3}$	$100 : \sqrt{3}/100$	—	500	1 000	2 000	1/1-12	630	2
НДЕ-500	$500\,000 : \sqrt{3}$	$100 : \sqrt{3}/100$	—	300	600	1 200	1/1-12	700	2

Примечания: 1. Трансформаторы серий НКФ и НДЕ выпускаются только для классов точности 1 и 3.
2. Трансформаторы напряжения сохраняют класс точности при повышении напряжения до 110% номинального.

Так, например, трансформатор напряжения типа НОМ-10, имеющий номинальную мощность 80 *ва* в классе точности 0,5, должен сохранять этот класс точности при следующих изменениях нагрузки:

а) при первичном напряжении, равном 0,9 номинального, в пределах нагрузки от $0{,}25\cdot 0{,}9^2\cdot 80=16{,}2$ *ва* до $0{,}9^2\cdot 80=64{,}8$ *ва*;

б) при номинальном первичном напряжении в пределах нагрузки от $0{,}25\cdot 80=20$ *ва* до 80 *ва*;

в) при первичном напряжении, равном 1,1 номинального, в пределах нагрузки от $0{,}25\cdot 1{,}1^2\cdot 80=24{,}2$ *ва* до $1{,}1^2\cdot 80=96{,}8$ *ва*.

2) Коэффициент мощности нагрузки должен быть равным 0,8.

3) Частота 50 *гц*.

Кроме того, трансформатор напряжения имеет максимальную мощность, которую он должен отдавать длительно без превышения предельно допустимой температуры обмоток, но в этом случае класс точности не нормируется.

6. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Трансформаторы напряжения применяются в цепях переменного тока при напряжении выше 220 *в*. Они используются для присоединения измерительных приборов — вольтметров, ваттметров, частотомеров, счетчиков и различных реле управления и защиты. Ниже приводятся наиболее часто применяемые схемы включения трансформаторов напряжения.

В цепь первичной обмотки трансформатора напряжения включаются предохранители и токоограничивающие сопротивления для того, чтобы в случае неисправности трансформатора он не оказался причиной аварии. Включение трансформатора обычно производится разъединителями. Предохранители, установленные во вторичной цепи, служат для защиты трансформатора от возможных замыканий в этой цепи.

Разъединители и токоограничивающие сопротивления, установленные в цепи первичной обмотки, в схемах, приведенных ниже, не показаны, поскольку они являются элементами схемы первичной коммутации.

Однофазный двухобмоточный трансформатор напряжения применяется в установках как однофазного, так

и трехфазного тока. В последнем случае он обычно включается на линейное напряжение трехфазной сети. Схема присоединения однофазного двухобмоточного трансформатора напряжения к трехфазной сети показана на рис. 1. Один из вводов вторичной обмотки для обеспечения безопасности при обслуживании заземляется при установке трансформатора.

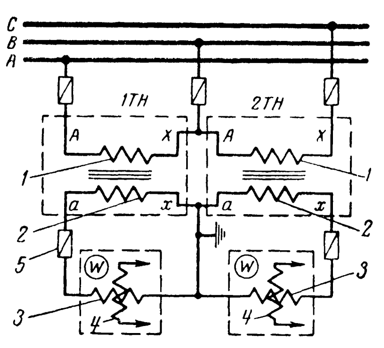


Рис. 2. Присоединение двух однофазных двухобмоточных трансформаторов напряжения к трехфазной сети по схеме открытого треугольника для измерения мощности по методу двух ваттметров.

1 — первичные обмотки; *2* — вторичные обмотки; *3* — обмотки напряжения ваттметров; *4* токовые обмотки ваттметров; *5* — предохранители; *1TH* — первый трансформатор; *2TH* — второй трансформатор.

Два однофазных трансформатора напряжения, соединенных в схему так называемого открытого треугольника, могут быть применены для включения ваттметров, счетчиков и регуляторов напряжения.

Схема открытого треугольника состоит из двух присоединенных к трехфазной системе однофазных трансформаторов напряжения, как это показано на рис. 2.

В отличие от схемы треугольника, векторная диаграмма схемы открытого треугольника представляет собой лишь две стороны правильного треугольника. Для этой схемы характерно то, что общая мощность обоих трансформаторов равняется не сумме их мощностей, а лишь мощности одного трансформатора, умноженной на $\sqrt{3}$, т. е. на 13% меньше суммы их мощностей.

Однофазные двухобмоточные трансформаторы напряжением до 35 *кв* могут быть соединены в трехфазную группу по схеме звезда-звезда с заземлением нулевых точек первичной и вторичной обмоток (ВН и НН), как это видно из рис. 3.

Однофазные трехобмоточные трансформаторы напряжения типа ЗНОМ изготовляются однополюсными, т. е. имеющими только один линейный ввод (*A*) первичной

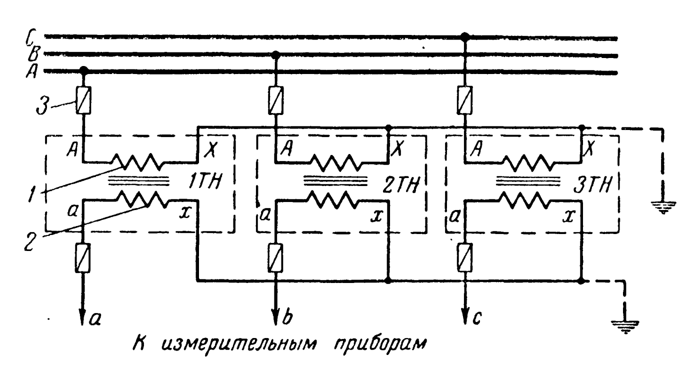


Рис. 3. Присоединение трех однофазных двухобмоточных трансформаторов напряжения к трехфазной сети 35 *кв* по схеме звезда-звезда с заземлением нулевых точек.

1 — первичные обмотки; *2* — вторичные обмотки; *3* — предохранители; *1ТН* — первый трансформатор; *2ТН* — второй трансформатор; *3ТН* — третий трансформатор.

(ВН) обмотки с изоляцией, соответствующей полному номинальному напряжению. Схема трансформатора напряжения ЗНОМ показана на рис. 4. Посредством вводов ВН трансформатор включается между линейным проводом и землей, и поэтому первичная обмотка рас-

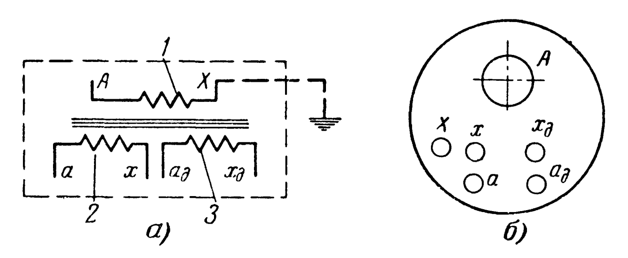


Рис. 4. Схема обмоток и расположения вводов на крышке однофазного трехобмоточного трансформатора типа ЗНОМ-35-54.

а — схема обмоток; *1* — первичная обмотка; *2* — вторичная обмотка основная; *3* — то же дополнительная; *б* расположение вводов.

считывается на фазное напряжение, равное линейному напряжению сети, деленному на $\sqrt{3}$. Однако согласно ГОСТ трансформаторы типа ЗНОМ напряжением до 35 *кв* включительно должны допускать длительную работу при аварийном режиме, т. е. при наличии линейного напряжения на первичной обмотке.

Дополнительные вторичные обмотки трех однофазных трехобмоточных трансформаторов, соединенные по схеме разомкнутого треугольника, служат для включения реле защиты от замыкания на землю. Схема такой системы показана на рис. 7, а о контроле изоляции сети подробно изложено в § 7.

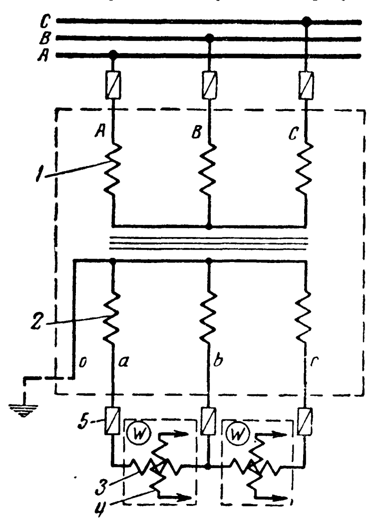


Рис. 5. Присоединение трехфазного двухобмоточного трансформатора напряжения типа НТМК к трехфазной сети для измерения мощности по методу двух ваттметров.

1 — первичная обмотка; *2* — вторичная обмотка; *3* — обмотки напряжения ваттметров; *4* — токовые обмотки ваттметров; *5* — предохранители.

Трехфазный трехстержневой двухобмоточный трансформатор напряжения типа НТМК имеет первичную обмотку, соединенную в звезду, а вторичную обмотку — в звезду с выведенной нулевой точкой, которая при установке трансформатора заземляется, как это видно из рис. 5.

Трехфазные трехобмоточные трансформаторы напряжения типа НТМИ изготовляются пятистержневыми. Первичная и основная вторичная обмотки соединены в звезду с выведенной нулевой точкой. Дополнительная вторичная обмотка соединена в разомкнутый треугольник, как показано на рис. 6. Нулевая точка первичной обмотки при установке трансформатора заземляется для отвода в землю статических зарядов, наводимых в линии. Основная вторичная обмотка питает различные измерительные приборы и ее нулевая точка также при установке заземляется, а дополнительная вторичная обмотка служит для контроля изоляции сети, и к ней подключается реле защиты от заземления.

Таким же образом соединяются в трехфазную группу каскадные трансформаторы напряжения типа НКФ, о которых будет сказано в § 19, и однофазные трехобмоточные трансформаторы типа ЗНОМ, как это показано на рис. 7.

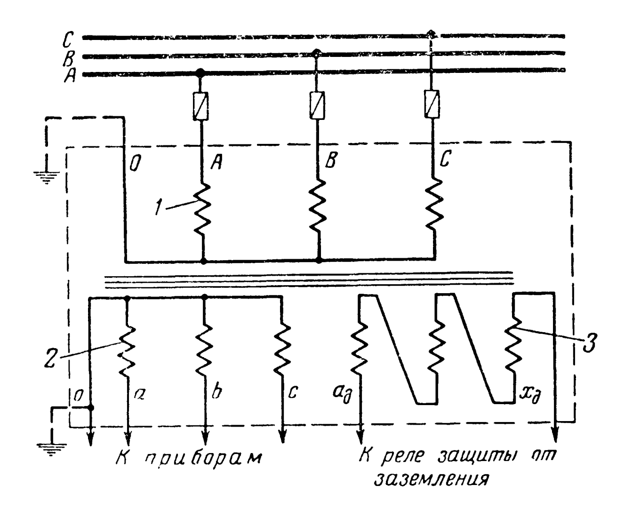


Рис. 6. Присоединение трехфазного трехобмоточного пятистержневого трансформатора напряжения типа НТМИ к трехфазной сети.

1 — первичная обмотка; *2* — вторичная основная обмотка; *3* — вторичная дополнительная обмотка.

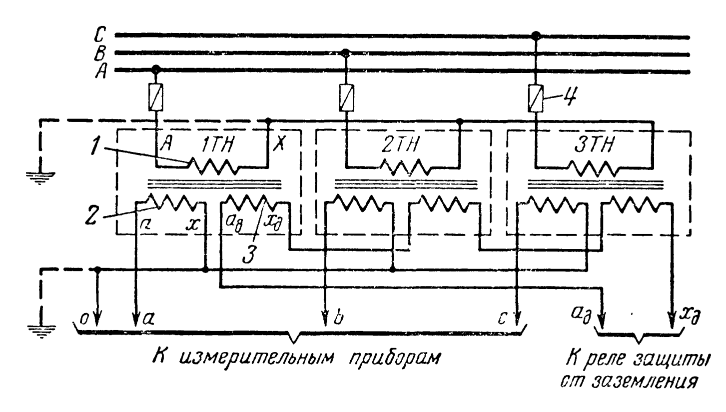


Рис. 7. Присоединение трех однофазных трехобмоточных трансформаторов напряжения типа ЗНОМ к трехфазной сети.

1 — первичные обмотки; *2* — вторичные основные обмотки; *3* — вторичные дополнительные обмотки; *4* — предохранители; *1ТН*, *2ТН*, *3ТН* — первый, второй и третий трансформаторы.

7. КОНТРОЛЬ ИЗОЛЯЦИИ СЕТИ

Важной областью применения трансформаторов напряжения является использование их для контроля изоляции сети.

Как было сказано выше, для этой цели служат дополнительные вторичные обмотки трехобмоточных трансформаторов напряжения, показанные на рис. 6 и 7.

Распределительные сети высокого напряжения в зависимости от характеристики нейтрали разделяются на две системы:

1) система с заземленной нейтралью, представляющая собой систему с большими токами замыкания на землю; в СССР она обычно применяется для сетей напряжением 110 *кв* и выше;

2) система с изолированной нейтралью с малыми токами замыкания на землю и обычно включенной в нейтраль дугогасящей катушкой; эта система применяется в сетях напряжением до 35 *кв* включительно.

В зависимости от режима нейтрали фазные напряжения дополнительной вторичной обмотки по напряжению холостого хода будут отличаться друг от друга.

При нормальной работе сети напряжение на вводах $a_д—x_д$, как видно на диаграммах рис. 8,*б* и 9,*б* разомкнутого треугольника, равно нулю и реле защиты, присоединенное к этим вводам, бездействует.

Практически ввиду несимметрии магнитной системы и наличия высших гармонических магнитного потока напряжение на этих вводах будет составлять при нормальном режиме несколько процентов номинального. При холостом ходе ГОСТ допускается напряжение, не превышающее 8 *в*. Напряжение на зажимах разомкнутого треугольника будет равно нулю лишь при одинаковых фазных напряжениях, изменяющихся точно по синусоиде.

При заземлении какой-либо фазы сети напряжение на вводах $a_д—x_д$ должно стать равным 100 *в*, т. е. напряжению срабатывания, на которое рассчитано реле защиты.

Рассмотрим процессы, происходящие в трансформаторе напряжения при замыкании одной из фаз на землю, для двух случаев состояния изоляции нейтрали:

1. Сеть с заземленной нейтралью (рис. 8).

В случае замыкания, например, фазы A сети на землю фаза A—0 трансформатора напряжения оказывается замкнутой накоротко и напряжение на обмотках этой фазы и, в частности, на дополнительной обмотке исчезнет. Как видно из диаграммы разомкнутого треуголь-

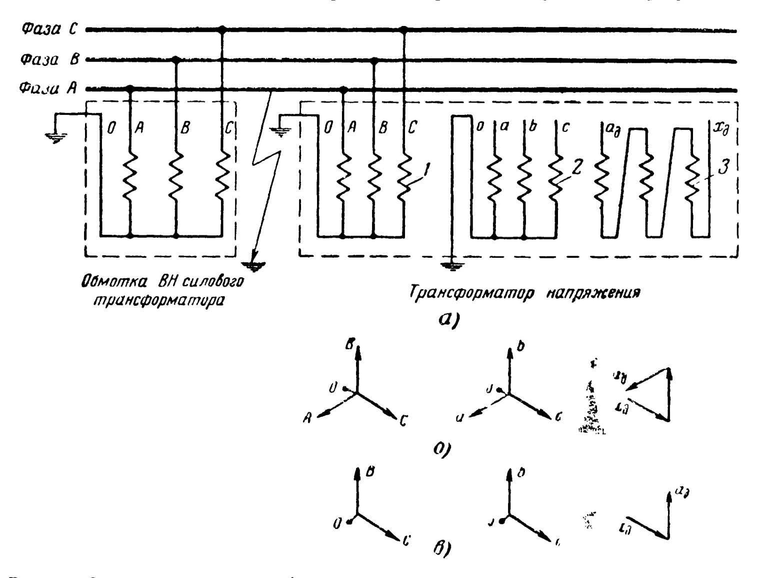


Рис. 8. Заземление фазы A в системе с глухозаземленной нейтралью.

а — общая схема; *1* — первичная обмотка; *2* вторичная основная обмотка; *3* — вторичная дополнительная обмотка; *б* — векторные диаграммы трансформатора напряжения до замыкания на землю; *в* — то же при замыкании фазы A на землю (вектор фазы A во всех диаграммах отсутствует, так как напряжение этой фазы равно нулю).

ника, на вводах $a_д$—$x_д$ появится напряжение, равное геометрической сумме напряжений действующих фаз B и C, т. е. равное фазному напряжению разомкнутого треугольника, как это видно из последней диаграммы рис. 8,*в*.

Так как напряжение на вводах $a_д$—$x_д$ при замыкании на землю должно быть равно 100 *в*, то и фазное напряжение дополнительной вторичной обмотки при системе с заземленной нейтралью должно быть тоже равным 100 *в*.

2. Сеть с изолированной нейтралью (рис. 9).

При замыкании на землю какой-либо фазы сети с изолированной нейтралью происходит более значи-

тельное изменение режима работы трансформатора напряжения, благодаря чему он конструктивно отличается от трансформатора напряжения, применяемого в сетях с заземленной нейтралью.

Предположим, что фаза A сети оказалась замкнутой на землю, как это видно на рис. 9.

Так как фаза A трансформатора напряжения замкнута накоротко, то фазы B и C оказываются под полным

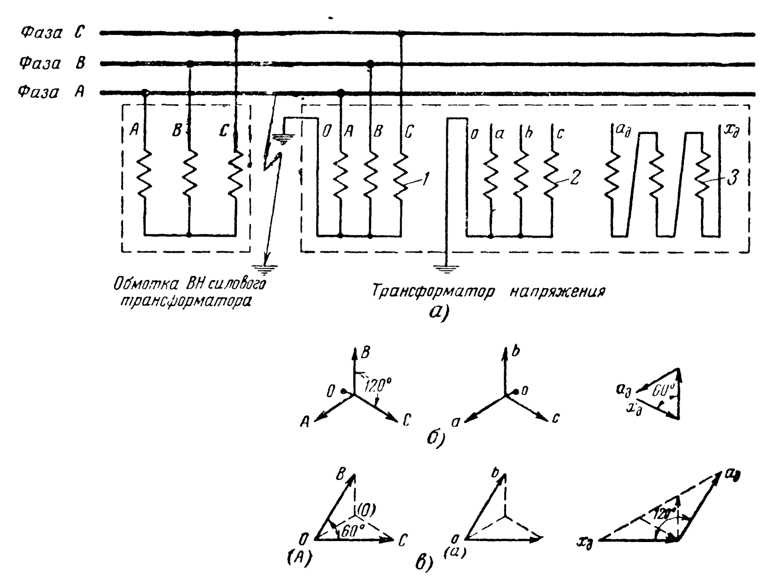


Рис. 9. Заземление фазы A в системе с изолированной нейтралью.
а — общая схема; *1* — первичная обмотка; *2* — вторичная основная обмотка; *3* — вторичная дополнительная обмотка; *б* — векторные диаграммы трансформатора напряжения до замыкания на землю; *в* — то же при замыкании фазы A на землю.

линейным напряжением и индукция в стержнях этих фаз увеличивается в $\sqrt{3}$ раз.

Кроме того, поскольку нейтральная точка O переместилась в точку A, как это видно на первой векторной диаграмме рис. 9,*в*, то угол между векторами OB и OC стал равным 60° вместо 120°, как это было до замыкания накоротко фазы A. Угол же между векторами действующих фаз B и C разомкнутого треугольника стал равным 120° вместо 60°. Отсюда следует, что напряжение на вводах $a_д$—$x_д$ при замыкании фазы A накоротко должно

увеличиться в 3 раза ($\sqrt{3} \times \sqrt{3}$). Но для того чтобы при замыкании какой-либо фазы на землю напряжение реле защиты оказалось равным 100 *в*, необходимо, чтобы фазное напряжение дополнительной вторичной обмотки при нормальном режиме было равным 100 : 3 *в*.

Ввиду того, что трансформаторы напряжения, включенные в сеть с изолированной нейтралью, должны длительно (не менее 4—6 *ч*) выдерживать режим замыкания на землю, при котором индукция возрастает в $\sqrt{3}$ раз, сечение стержней магнитопровода должно быть также увеличено в $\sqrt{3}$ раз.

Если для контроля изоляции сети применяется трехфазный трансформатор напряжения, то он должен иметь пятистержневой магнитопровод. Свободные от обмоток крайние стержни дают возможность замыкаться увеличенному в $\sqrt{3}$ магнитному потоку несимметрии, получившейся вследствие исчезновения потока в фазе, замкнутой накоротко. При отсутствии крайних стержней, т. е. при применении обычного трехстержневого магнитопровода, магнитный поток несимметрии будет замыкаться через стенки бака; это вызовет в обмотках остальных фаз большие намагничивающие токи, могущие вызвать недопустимое превышение температуры обмотки.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ И РАСЧЕТА

8. ХОЛОСТОЙ ХОД ТРАНСФОРМАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

а) Коэффициент трансформации

У силовых трансформаторов падением напряжения при холостом ходе обычно пренебрегают и при определении коэффициента трансформации K полагают, что

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = K, \qquad (2)$$

где U_1 и U_2 — первичное и вторичное напряжения;
E_1 и E_2 — первичная и вторичная э. д. с.;
w_1 и w_2 — число витков первичной и вторичной обмоток.

Таким образом, в силовых трансформаторах считают, что отношение первичного и вторичного напряжений на вводах трансформатора приблизительно равно отношению э. д. с. его обмоток и в свою очередь равно отношению чисел витков первичной и вторичной обмоток. Кроме того, у силовых трансформаторов при холостом ходе пренебрегают сдвигом по фазе векторов первичного и вторичного напряжений при построении векторной диаграммы.

У трансформаторов напряжения этим пренебрегать нельзя, так как погрешности, зависящие от падения напряжения в первичной обмотке при холостом ходе, по своей величине бывают соизмеримы с погрешностями при нагрузке. В результате этого может оказаться чрезмерно большая погрешность, которая выведет трансформатор из заданного класса точности.

Для более ясного представления о зависимости погрешностей от режимов работы трансформатора рассмотрим процессы, происходящие при холостом ходе и при нагрузке трансформатора напряжения.

б) Режим холостого хода трансформатора

Подводимое с первичной стороны переменное напряжение U_1 согласно второму закону Кирхгофа, с одной стороны, должно уравновешивать электродвижущую силу, наведенную в первичной обмотке E_1, направленную противоположно U_1, и, с другой стороны, должно компенсировать падение напряжения, возникающее в первичной обмотке вследствие наличия в ней тока холостого хода. Если пренебречь падением напряжения, то первичное напряжение U_1, обратная ему э. д. с. E_1 и магнитный поток Ф могут быть представлены кривыми (синусоидами), изображенными на рис. 10.

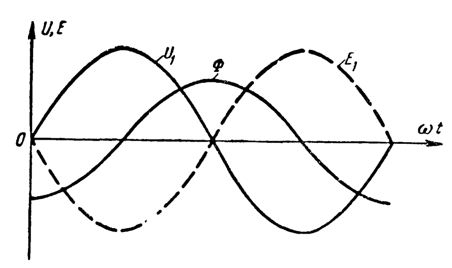


Рис. 10. Кривые первичного напряжения U_1, э. д. с. E_1 и магнитного потока Ф.

Обычно кривые синусоидально изменяющихся величин заменяют векторными диаграммами, что более удоб-

но. Тогда система кривых рис. 10 может быть заменена векторной диаграммой, представленной на рис. 11.

Стрелка около начала координат показывает принятое положительное направление вращения векторов.

Векторная диаграмма рис. 11 была бы справедлива только для идеального трансформатора, т. е. трансформатора, у которого отсутствуют потери энергии. Однако у реального трансформатора имеются потери как в стали магнитопровода, так и в меди обмотки, и благодаря этому векторная диаграмма несколько усложняется.

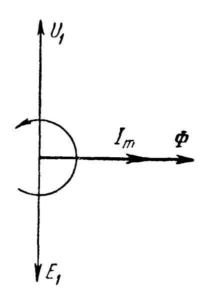


Рис. 11. Векторная диаграмма первичного напряжения U_1, э. д. с. E_1 и магнитного потока Ф.

У идеального трансформатора при холостом ходе по первичной обмотке проходит чисто намагничивающий ток, т. е. ток, создающий намагничивающую силу н. с., необходимый для образования магнитного потока Ф сцепленного с обеими обмотками (ВН и НН) трансформатора. Вектор намагничивающего тока I_m, очевидно, должен совпадать по направлению с вектором потока Ф.

У реального трансформатора ток холостого хода состоит из реактивной составляющей (намагничивающий ток I_m) и активной составляющей I_a, вызываемой потерями холостого хода. Вектор полного тока холостого хода I_0 является геометрической суммой векторов I_m и I_a, как это видно на рис. 12.

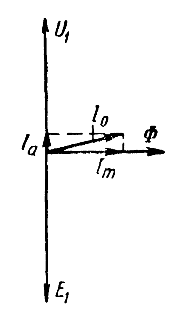


Рис. 12. Упрощенная векторная диаграмма холостого хода.

Ток холостого хода I_0, проходящий по первичной обмотке, вызывает в ней активное падение напряжения U_{a10}, равное I_0r_1 (где r_1 — активное сопротивление первичной обмотки). Этот же ток I_0 создает некоторый поток рассеяния $\Phi_р$, который, в свою очередь, вызывает в первичной обмотке э. д. с. рассеяния $E_{р10}$. Взятая с обратным знаком э. д. с. $E_{р10}$ называется индуктивным падением напряжения и может быть обозначена через $U_{р10}$, т. е. — $E_{р10} = U_{р10}$. Так как э. д. с. $E_{р10}$ отстает по фазе от потока

$\Phi_р$ и, следовательно, от тока I_0 на 90°, то, как показано на векторной диаграмме рис. 13, вектор $U_{р10}$ должен опережать вектор тока I_0 на 90°. Вектор $U_{а10}$ на той же

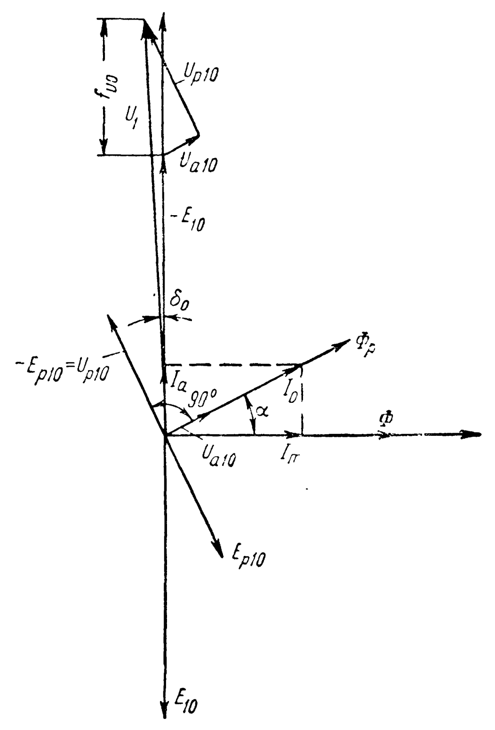


Рис. 13. Полная векторная диаграмма холостого хода.

диаграмме имеет одинаковое направление с вектором тока I_0.

Как видно из векторной диаграммы рис. 13, первичное напряжение U_1 должно компенсировать противоэлектродвижущую силу $-E_{10}$ и оба падения напряжения $U_{а10}$ и $U_{р10}$, и, следовательно, вектор U_1 должен быть равен геометрической сумме соответствующих векторов, т. е.

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_{10} + \dot{U}_{а10} + \dot{U}_{р10}. \quad (3)$$

У силовых трансформаторов, как было сказано выше, при опыте холостого хода обычно полагают $U_1 =$

$= -E_{10}$, пренебрегая падениями напряжения U_{a10} и U_{p10} (на векторной диаграмме векторы последних для большей наглядности показаны в сильно увеличенном размере).

9. РЕЖИМ НАГРУЗКИ ТРАНСФОРМАТОРА

Нагрузкой для трансформатора может служить активное, индуктивное или емкостное сопротивление. При включении нагрузки в первичной и вторичной обмотках трансформатора возникают нагрузочные токи, которые вызывают в них соответствующие активные и индуктивные падения напряжения. При этом в первичной обмотке эти падения напряжения суммируются (геометрически) с падениями напряжения, вызываемыми током холостого хода.

Графически это также изображается векторной диаграммой. Для большей наглядности векторную диаграмму несколько преобразовывают. Во-первых, векторы вторичных э. д. с. и тока приводят к первичным, т. е. полагают $E_1 = E'_2$ и $I'_1 = I'_2$, и, во-вторых, векторы вторичных токов и напряжений поворачивают на 180° так, что векторы $-E_1$ и E'_2, а также I'_1 и I'_2 совмещаются (рис. 14).

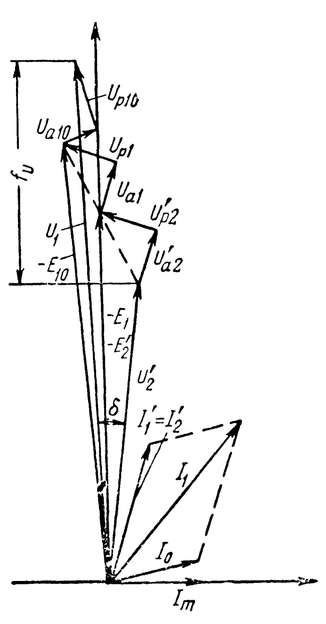


Рис. 14. Векторная диаграмма при индуктивной нагрузке.

На рис. 14 представлена векторная диаграмма при индуктивной нагрузке. Векторы имеют следующие обозначения:

U_{a10} — активное падение напряжения в первичной обмотке от тока холостого хода I_0;

U_{a1} — активное падение напряжения в первичной обмотке от тока нагрузки I'_1;

U'_{a2} — активное падение напряжения во вторичной обмотке (приведенное к первичной обмотке);

U_{p10} — индуктивное падение напряжения в первичной обмотке от тока холостого хода I_0;

U_{p1} — индуктивное падение напряжения в первичной обмотке от тока нагрузки I'_1;

U'_{p2} — индуктивное падение напряжения во вторичной обмотке (приведенное к первичной обмотке);

U_1 — первичное напряжение;

$-E_{10}$ — первичная противоэлектродвижущая сила при холостом ходе;

$-E_1$ — то же при нагрузке;

E'_2 — приведенная к первичной обмотке вторичная э. д. с. при нагрузке;

U'_2 — приведенное к первичной обмотке вторичное напряжение;

I'_1 и I'_2 — первичный и приведенный вторичный нагрузочные токи;

I_1 — общий первичный ток;

I_0 — ток холостого хода;

f_U — погрешность напряжения;

δ — угловая погрешность.

Так как вторичный ток I'_2 нагрузки вызывает во вторичной обмотке активное и индуктивное падения напряжения U'_{a2} и U'_{p2}, то вторичная э. д. с. E'_2, кроме вторичного напряжения U'_2, должна также компенсировать эти падения напряжения. Отсюда вторичное напряжение на вводах вторичной обмотки будет меньше э. д. с. на величину падений напряжения, т. е.

$$\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{U}'_{a2} - \dot{U}'_{p2}. \tag{4}$$

Первичный нагрузочный ток I'_1, возникающий по закону полного тока в первичной обмотке, также вызывает в ней активное и индуктивное падения напряжения U_{a1} и U_{p1}. Эти падения напряжения, сложенные с падениями напряжения при холостом ходе U_{a10} и U_{p10}, должны компенсироваться первичным напряжением U_1. Таким образом можно записать, что

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{U}_{a10} + \dot{U}_{p10} + \dot{U}_{a1} + \dot{U}_{p1}. \tag{5}$$

На рис. 14 для большей наглядности векторы падений напряжения, так же как на рис. 13, показаны в сильно увеличенном размере.

10. ПОГРЕШНОСТИ ОДНОФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

На основании векторных диаграмм могут быть выведены формулы для расчета погрешностей трансформатора напряжения.

а) Расчет погрешностей при холостом ходе

Погрешность напряжения f_{U0} можно найти, пользуясь векторной диаграммой рис. 13.

Согласно определению для режима холостого хода

$$f_{U0} = -E_{10} - U_1.$$

Ввиду малого угла δ_0 между векторами U_1 и $-E_{10}$ можно считать, что вектор U_1 равен своей проекции на ось ординат. Тогда получим, что погрешность напряжения, выраженная в процентах,

$$f_{U0} = -(U_{a10} \sin \alpha + U_{p10} \cos \alpha) \quad \%,$$

где U_{a10} и U_{p10} — активное и индуктивное падения напряжения в первичной обмотке, % первичного напряжения U_1;

α — угол между вектором тока холостого хода I_0 и его реактивной составляющей I_m (этот угол называется углом магнитного запаздывания).

Знак — перед скобкой указывает на то, что погрешность отрицательна.

Значения U_{a10} и U_{p10} преобразуем следующим образом:

$$U_{a10} = U_{a1} \frac{I_0}{I_1} = U_{a1} \frac{I_a}{I_1 \sin \alpha} = U_{a1} \frac{i_a}{\sin \alpha};$$

$$U_{p10} = U_{p1} \frac{I_0}{I_1} = U_{p1} \frac{I_m}{I_1 \cos \alpha} = U_{p1} \frac{i_p}{\cos \alpha},$$

где U_{a1} и U_{p1} — активное и индуктивное падения напряжения в первичной обмотке при номинальной нагрузке;

$i_а$ и $i_р$ — отношения активной и реактивной составляющих тока холостого хода к номинальному току (активная и реактивная составляющие тока холостого хода в долях номинального тока).

Подставив значения $U_{а10}$ и $U_{р10}$ в формулу, получим:

$$f_{U0} = -(U_{а1} i_а + U_{р1} i_р). \qquad (6)$$

Угловая погрешность при холостом ходе согласно определению будет являться углом δ_0 между векторами U_1 и $-E_{10}$.

Ввиду малого значения угла δ_0 можно считать, что

$$\operatorname{tg} \delta_0 \approx \delta_0.$$

Если угловую погрешность выразить в минутах, то, пользуясь векторной диаграммой, аналогично формуле для погрешности напряжения получим:

$$\delta_0 = \frac{3\,440}{100}(U_{а10} \cos \alpha - U_{р10} \sin \alpha) = 34{,}4\,(U_{а1} i_р - U_{р1} i_а), \qquad (7)$$

где постоянная $3\,440 = \frac{360 \cdot 60}{2\pi}$ *мин/рад*.

Угловая погрешность считается положительной, если вектор $-E_1$ опережает вектор U_1. Таким образом, для примера на рис. 13 угловая погрешность δ_0 будет отрицательной.

б) Расчет погрешностей при нагрузке

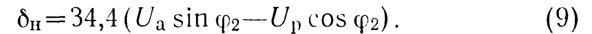
Погрешность напряжения $f_{Uн}$, вызываемая нагрузкой, определяется по обычной формуле изменения напряжения

$$f_{Uн} = -(U_а \cos \varphi_2 + U_р \sin \varphi_2), \qquad (8)$$

где $U_а = U_{а1} + U_{а2}$ и $U_р = U_{р1} + U_{р2}$ — суммарные активные и индуктивные падения напряжения в первичной и вторичной обмотках от нагрузки;

$\cos \varphi_2$ — коэффициент мощности нагрузки.

Угловая погрешность. Выразив угловую погрешность $\delta_н$ в минутах и приняв, как и при холостом ходе, что $\operatorname{tg}\delta_н \approx \delta_н$, на основании векторной диаграммы рис. 14 будем иметь:



$$\delta_н = 34{,}4\,(U_а \sin\varphi_2 - U_р \cos\varphi_2). \tag{9}$$

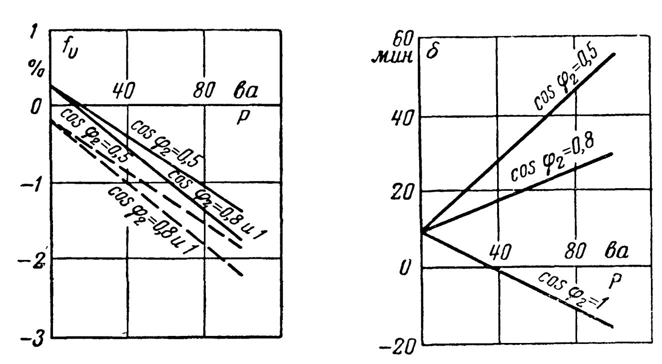


Рис. 15. Погрешности напряжения и угла однофазного трансформатора напряжения типа НОС-0,5, 500/100 *в*.

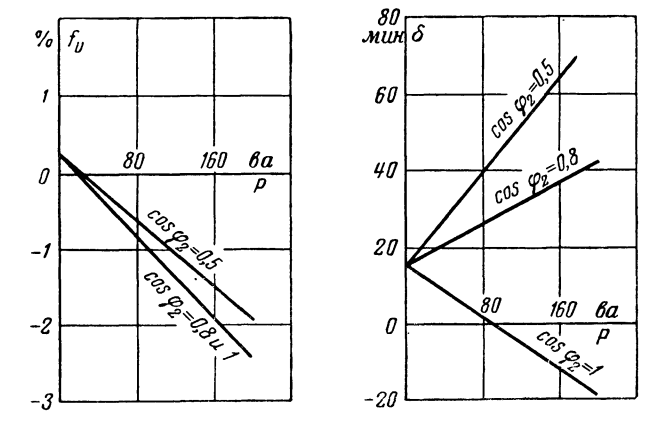


Рис. 16. Погрешности напряжения и угла однофазных трансформаторов напряжения типов НОСК-6 и НОМ-6, 6 000/100 *в*.

Полная погрешность при нагрузке определяется как сумма погрешностей от тока холостого хода и от тока нагрузки, т. е. $f_U = f_{U0} + f_{Uн}$ — полная погрешность напряжения; $\delta = \delta_0 + \delta_н$ — полная угловая погрешность.

Более подробно расчет погрешностей однофазного, трехфазного и трехфазного пятистержневого трансформаторов напряжения с примерами расчета дан в приложении 1.

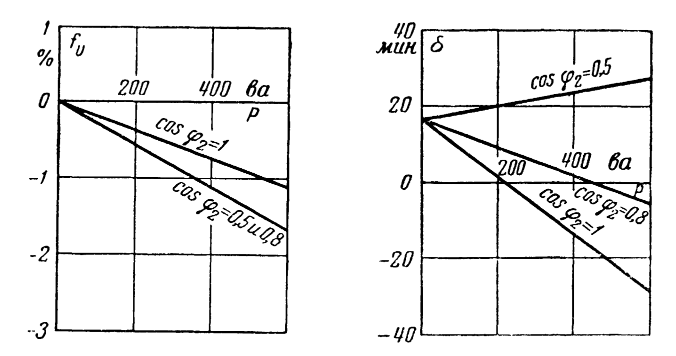


Рис. 17. Погрешности напряжения и угла однофазного трансформатора напряжения типа НОМ-35, 35 000/100 *в*.

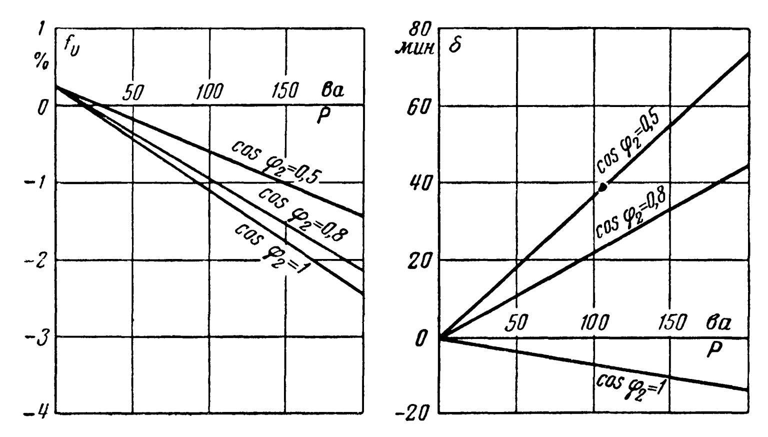


Рис. 18. Погрешности линейного напряжения и угловые трехфазного трансформатора напряжения типа НТС-0,5, 500/100 *в* (фаз *A—C*).

Как видно из формул (8) и (9), значения погрешностей, вызываемых нагрузкой, пропорциональны падениям напряжения, а следовательно, и току нагрузки. Поэтому кривые зависимости погрешностей в функции нагрузки фактически являются прямыми.

На рис. 15—20 приведены расчетные значения погрешностей напряжения f_U % и угловых погрешностей δ' некоторых типов трансформаторов напряжения в зависимости от величины нагрузки при различных значениях коэффициента мощности ($\cos\varphi_2=0{,}5$; 0,8 и 1) и напряжении, равном 110% номинального.

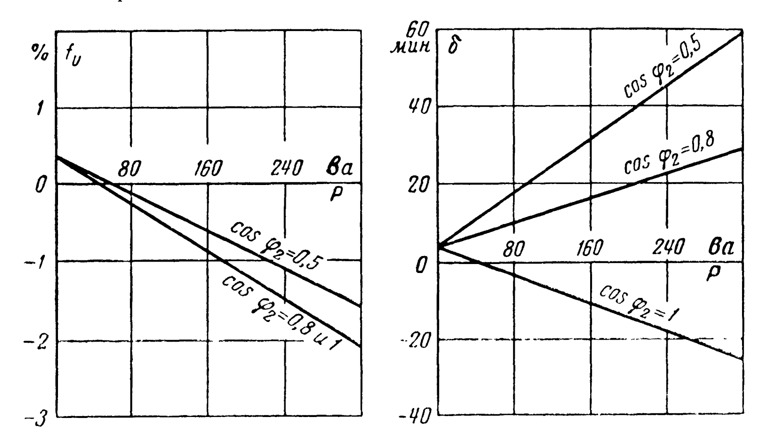


Рис. 19. Погрешности линейного напряжения и угловые трехфазного пятистержневого трансформатора напряжения типа НТМИ-6, 6 000/100/100 : 3 *в* (фаз *А—С*), отнесенные к основной вторичной обмотке 100 *в*.

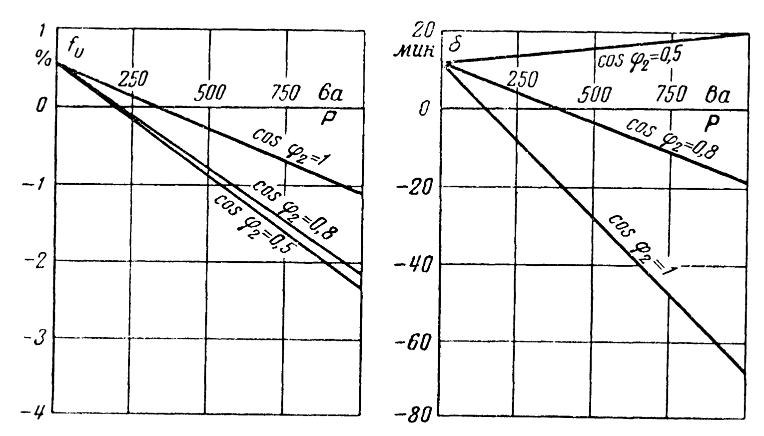


Рис. 20. Погрешности напряжения и угла однофазного каскадного трансформатора напряжения типа НКФ-110-57, 110 000 : $\sqrt{3}$/100 : $\sqrt{3}$/100 *в* (отнесенные к основной вторичной обмотке 100 : $\sqrt{3}$ *в*).

11. КОРРЕКЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ

Падения напряжения трансформатора могут быть в некоторой степени компенсированы введением так называемой коррекции напряжения.

Коррекцией напряжения $f_{U\text{к}}$ называется преднамеренное изменение коэффициента трансформации в сторону повышения вторичного напряжения, выраженное в процентах.

Как видно из формул (6) и (8), погрешность напряжения всегда отрицательна. Путем введения коррекции уменьшают абсолютные значения погрешности за счет использования положительных значений погрешностей. На рис. 15 пунктирные линии соответствуют погрешностям напряжения без коррекции, а сплошные линии — погрешностям с коррекцией. Разность ординат пунктирной и сплошной линий равна коррекции напряжения $f_{U\text{к}}$.

Коррекцию выполняют таким образом, чтобы при холостом ходе трансформатор имел некоторую положительную погрешность (в пределах заданного класса точности), т. е. несколько увеличивают вторичное напряжение. Однако на практике вместо увеличения числа витков во вторичной обмотке обычно уменьшают их на первичной, так как коррекция может быть при этом подобрана более точно.

Число уменьшаемых витков $w_\text{к}$ определяется по формуле

$$w_\text{к} = w \frac{f_{U\text{к}}}{100}, \qquad (10)$$

где w — полное число витков первичной обмотки.

Применение коррекции напряжения позволяет получить известную экономию активных материалов.

Кроме коррекции напряжения, часто требуется введение также и угловой коррекции.

Коррекция угловой погрешности у однофазных трансформаторов не может быть выполнена. Однако она может быть осуществлена у трехфазных трансформаторов напряжения.

Первичная обмотка трехфазных трансформаторов напряжения обычно соединяется в звезду. Для осуществления угловой коррекции $\delta_\text{к}$ соединение в нулевую точку производится посредством дополнительных компенсационных обмоток, расположенных на соседних фа-

зах и включаемых последовательно с основными ветвями звезды. Таким образом получается схема, подобная схеме зигзага с неравными плечами, как это показано на рис. 21,*а*.

Как видно из векторной диаграммы рис. 21,*в*, корректирующие угол витки компенсационной обмотки одно-

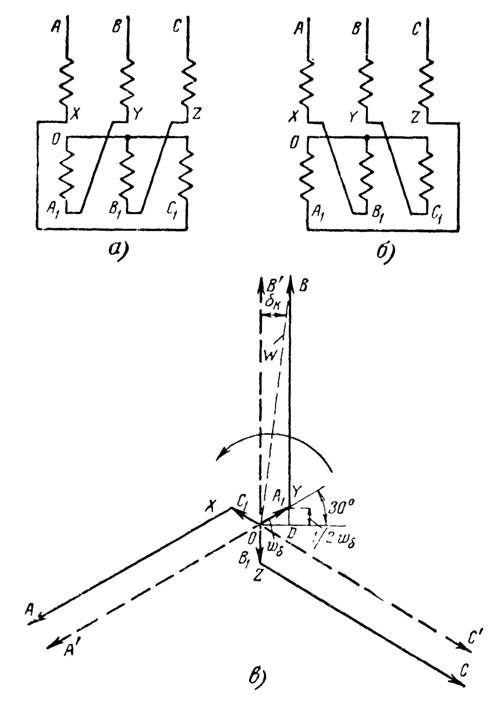


Рис. 21. Компенсация угловой погрешности для трехфазного двухобмоточного трансформатора напряжения.

а — принципиальная схема обмотки ВН для получения положительной компенсации угловой погрешности; *б* — то же для получения отрицательной компенсации; *в* — векторная диаграмма к схеме *а*.

временно вносят также и коррекцию напряжения (так как векторы OA_1 и BY образуют угол 120°), что должно быть учтено при расчете.

Расчет корректирующих витков начинают с определения числа витков w_δ компенсационной обмотки, составляющих меньшее плечо зигзага.

На рис. 21,*в*: $OB=w$ — полное число витков на фазу; $OA_1=w_\delta$ — число витков компенсационной обмотки.

Полагая ввиду малого значения угла $\delta_к$, что $BD\approx OB$ и $\delta_к\approx \operatorname{tg}\delta_к$, имеем:

$$\frac{\delta_к}{3\,440}=\frac{OD}{BD}=\frac{OA_1\cos 30^\circ}{BD}=\frac{w_\delta\cos 30^\circ}{w},$$

откуда

$$w_\delta=\frac{\delta_к}{3\,440\cos 30^\circ}w=0{,}336\delta_к w\cdot 10^{-3}. \qquad (11)$$

Затем определяют число витков $w_к$, на которое следует уменьшить w основной ветви каждой фазы первичной обмотки, соединенной по схеме зигзага, для получения необходимого значения $f_{Uк}$ коррекции напряжения.

Число витков $w_к$ с учетом угла 30° между вектором OA_1 и отрезком OD будет равно:

$$w_к=w\frac{f_{Uк}}{100}+\sin 30^\circ w_\delta=w\frac{f_{Uк}}{100}+\frac{1}{2}w_\delta. \qquad (12)$$

Схема рис. 21,*а*, применяемая для первичной обмотки, дает положительную компенсацию (т. е. она компенсирует отрицательную угловую погрешность § 10). На векторной диаграмме рис. 21,*в*, соответствующей схеме рис. 21,*а*, векторы *XA*, *YB* и *ZC* сдвинуты относительно их первоначального положения *OA′*, *OB′*, *OC′* (при отсутствии компенсации) против направления их вращения. Следовательно, эта схема должна применяться в тех случаях, когда средние расчетные значения угловой погрешности получаются отрицательными.

Угол между вектором *OB′* и отрезком *OB* является угловой коррекцией $\delta_к$ трехфазного трансформатора напряжения.

Если угловые погрешности по расчету получаются положительными, то угловая коррекция $\delta_к$ должна быть отрицательной. Расчет абсолютного значения этой коррекции производится также по формулам (11) и (12), но для перемены знака коррекции необходимо изменить последовательность схемы соединения з и г з а г, т. е. следует применить схему рис. 21,*б*.

Так как знак угловой коррекции зависит также от чередования фаз, т. е. от чередования максимальных

значений (одинакового знака) синусоид напряжения сети для всех трех фаз в течение одного периода, то необходимо, чтобы такое чередование соответствовало направлению вращения векторов трансформатора напряжения. Это соответствие обязательно должно быть соблюдено при включении трансформатора в сеть. Для этой цели на трехфазных трансформаторах напряжения, у которых применена угловая коррекция, имеется специальный щиток с указанием правильного порядка чередования фаз (обычно *А* — *В* — *С*).

12. СХЕМЫ И ГРУППЫ СОЕДИНЕНИЙ

Фазные э. д. с., наводимые в обмотках ВН и НН, расположенных на одном и том же стержне магнитопровода, будут либо совпадать между собой по фазе, либо будут **сдвинуты на угол 180°** в зависимости от направления намотки катушек (о направлении намотки см. § 15) и от обозначения выводных концов обеих обмоток.

Из различных возможных способов, по которым могут определяться сдвиги фаз э. д. с. обмоток друг относительно друга, т. е. группы соединения, может быть предложен следующий.

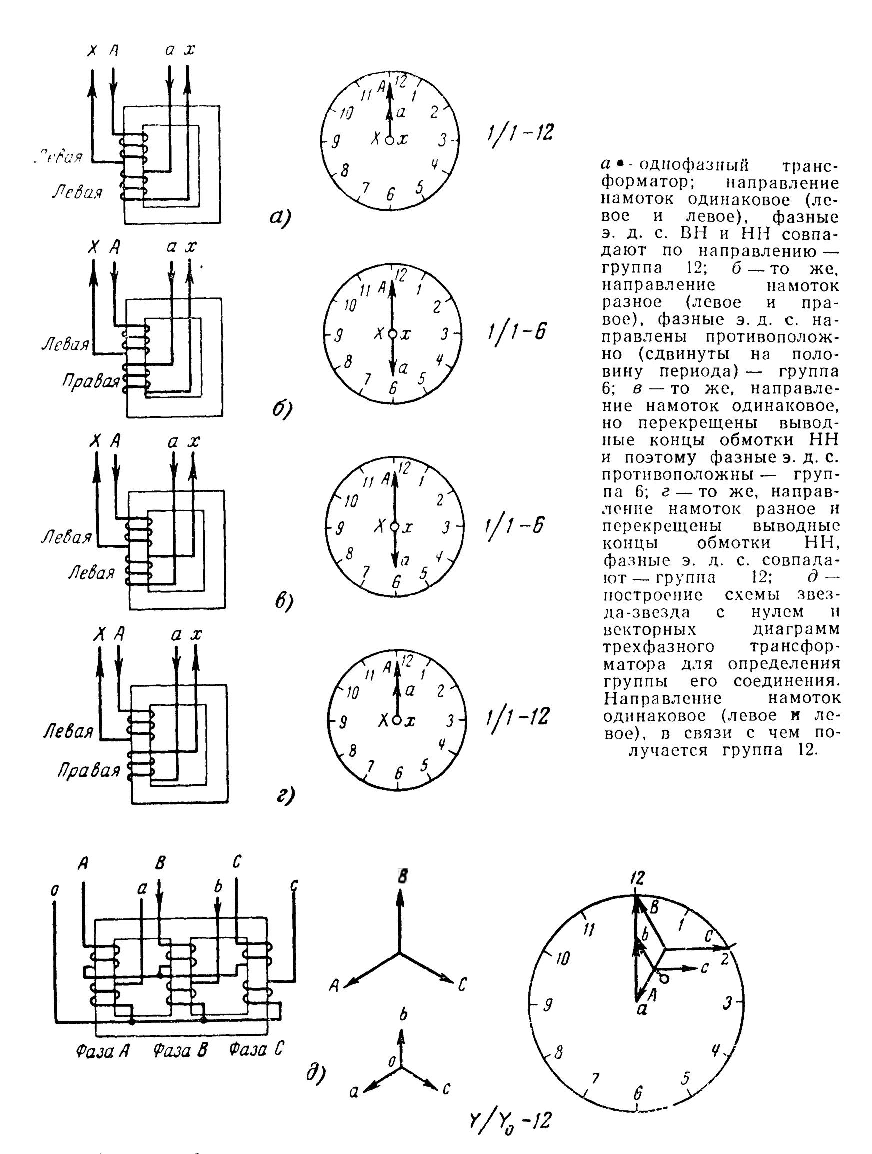
Возьмем для простоты рассуждений однофазный трансформатор, имеющий, как обычно, две обмотки, насаженные на магнитопровод, как это схематично показано на рис. 22,*а*.

Представим себе, что по обеим обмоткам от их начальных вводов *А* и *а* одновременно проходят токи, показанные стрелками.

Предположим, что эти токи будут иметь одинаковое направление в обеих обмотках, например против часовой стрелки, если смотреть сверху (рис. 22,*а*). В таком трансформаторе фазные э. д. с., наводимые в обмотках ВН и НН при возникновении магнитного потока в магнитопроводе, будут совпадать по фазе.

Если изменить направление намотки одной из обмоток или пересоединить выводные концы одной из них, как показано на рис. 22,*б* и *в*, то фазные э. д. с. будут сдвинуты на угол 180°, т. е. на половину периода друг относительно друга.

Трехфазные трансформаторы имеют обмотки, соединенные обычно по схеме звезды или треугольника. В за-



а - однофазный трансформатор; направление намоток одинаковое (левое и левое), фазные э. д. с. ВН и НН совпадают по направлению — группа 12; *б* — то же, направление намоток разное (левое и правое), фазные э. д. с. направлены противоположно (сдвинуты на половину периода) — группа 6; *в* — то же, направление намоток одинаковое, но перекрещены выводные концы обмотки НН и поэтому фазные э. д. с. противоположны — группа 6; *г* — то же, направление намоток разное и перекрещены выводные концы обмотки НН, фазные э. д. с. совпадают — группа 12; *д* — построение схемы звезда-звезда с нулем и векторных диаграмм трехфазного трансформатора для определения группы его соединения. Направление намоток одинаковое (левое и левое), в связи с чем получается группа 12.

Рис. 22. Определение группы соединения однофазного и трехфазного трансформаторов в часовом обозначении по схеме соединения обмоток и при известном направлении намотки.

висимости от схемы соединения, применяемой для каждой из обмоток, линейные э. д. с. ВН и НН могут иметь сдвиг по фазе на различные углы. В схемах звезды и треугольника эти углы кратны 30°, поэтому для их выражения удобно пользоваться часовым обозначением, принятым ГОСТ 401-41. Один час соответствует 30°, поэтому сдвиг фаз 0° или 360° соответствует 12 *ч* (360 : 30 = = 12), 330° — 11 *ч* (330 : 30 = 11) и т. д.

При определении сдвига фаз вектор э. д. с. ВН должен устанавливаться на 12 *ч* часового циферблата; тогда вектор э. д. с. НН, установленный в соответствии со схемой соединения, укажет сдвиг фаз в часах или группу соединения.

Группой соединения трансформаторов, в том числе и трансформаторов напряжения, называется выраженный в часах угол сдвига по фазе линейной э. д. с. обмотки НН (для трансформаторов напряжения — основной вторичной) по отношению к линейной э. д. с. обмотки ВН (первичной).

На рис. 22 показаны схемы обмоток с обозначениями их концов, показанными направлениями токов в обмотках и векторные диаграммы, помещенные в часовой циферблат.

В случае трехфазного трансформатора сначала совмещаются концы векторов *A* и *a* векторных диаграмм обмоток ВН и НН. Затем, как указывалось выше, вектор *AB* линейной э. д. с. ВН помещают в часовой циферблат таким образом, чтобы конец вектора ВН указывал на 12 *ч*. Тогда вектор *ab* линейной э. д. с. НН своим концом *b* укажет на цифру часового циферблата, соответствующую группе соединения.

Определение группы соединения трехфазного трансформатора показано на рис. 22,*д*, где дан пример для схемы и группы соединения Y/Y_0-12 (звезда-звезда с выведенным нулем-двенадцать).

У трансформаторов напряжения как однофазных, так и трехфазных, имеющих обмотки, соединенные в схему звезды при группе соединения 12, одновременно с линейными должны совпадать по фазе также и фазные э. д. с. Последние, как было сказано выше, будут совпадать по фазе тогда, когда направление намотки витков в обеих обмотках (если начинать обход этих витков от линей-

ных вводов) будет одинаковым. Для этой цели необходимо, чтобы направление намотки обмоток (левое или правое) и обозначения их выводных концов, т. е. порядок присоединения концов к линейным вводам, были соответствующим образом согласованы между собой.

Так как под словом «конец» могут подразумеваться разные понятия, то во избежание путаницы условимся называть все концы обмотки вообще **выводными концами**. Из двух выводных концов один будем называть **началом** обмотки, а другой — ее **концом**.

У однофазных трансформаторов напряжения за начало обмотки ВН принимается ее выводной конец, присоединяемый к вводу (зажиму) *A*, а ее концом будет являться выводной конец, присоединямый к вводу *X*. Соответственно началом обмотки НН будет являться ее выводной конец, присоединяемый к вводу *a*, а концом — ее выводной конец, присоединяемый к вводу *x*.

У трехфазных трансформаторов напряжения начала обмоток ВН присоединяются к вводам, обозначенным *A*, *B* и *C* соответственно названиям фаз, а концы, соединяемые в нулевую (нейтральную) точку, — соответственно *X*, *Y*, *Z*. Начала обмоток НН присоединяются к вводам, обозначенным *a*, *b* и *c*, а концы — *x*, *y* и *z*. Нулевые вводы, в тех случаях когда применяется схема звезды с выведенным нулем, обозначаются О и о.

Следует заметить, что называемые нами **начало** и **конец** обмотки не обязательно должны совпадать с началом и концом намотки обмотки при ее изготовлении. Часто по конструктивным соображениям у готовой обмотки ее технологическое начало, т. е. выводной конец от ее первого витка, приходится называть и соответственно обозначать «концом», а ее технологический конец — «началом». Например, у обмотки ВН трансформатора напряжения типа ЗНОМ-35-54, показанной на рис. 46, ее технологическое начало считается концом обмотки и обозначается буквой *X*, а технологический конец — началом *A*. В другом случае у двойной катушки катушечной обмотки (см. § 15) ВН трансформатора напряжения типа НОМ-6 оба выводных конца являются технологическими концами катушек, как это видно на рис. 40. После того как двойная катушка намотана и снята с обмоточного станка, один из ее выводных концов становится **началом**, а другой **концом**.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ЭЛЕМЕНТЫ КОНСТРУКЦИИ

13. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Характерная особенность трансформаторов напряжения — их малая мощность при высоком напряжении первичной обмотки, накладывает на их конструкцию свой отпечаток. Размеры и вес трансформатора напряжения зависят главным образом не от его мощности (как у силовых трансформаторов), а от первичного напряжения.

Мощность трансформатора напряжения практически мало влияет на размеры трансформатора, так как по существу он работает в режиме, близком к режиму холостого хода.

Высокое значение первичного напряжения требует соответствующей изоляции первичной обмотки. Размеры этой изоляции, а также размеры вводов высокого напряжения в основном определяют размеры и вес трансформатора напряжения.

У трансформаторов напряжения часто приходится применять провода большего сечения, чем требует расчет, для того чтобы обеспечить необходимую механическую прочность первичных обмоток. Так, например, ввиду очень малых токов первичной обмотки сечение обмоточного провода должно быть тоже малым. Однако, исходя из технологических соображений, чтобы избежать обрывов провода при намотке катушек и увеличить его натяжение для получения более плотной катушки, сечение провода выбирают бо́льшим, чем это требуется по величине тока.

Для трансформаторов напряжения характерным является также то обстоятельство, что в связи с необходимостью иметь малые погрешности приходится допускать пониженные значения индукции в магнитопроводе и плотности тока в обмотке.

14. МАГНИТОПРОВОД

Для трансформаторов напряжения применяются магнитопроводы таких же конструкций, как и для силовых трансформаторов.

Для однофазных трансформаторов напряжения применяются магнитопроводы как броневого, так и стержневого типа, показанные на рис. 23,а для трехфазных — трехстержневые и пятистержневые магнитопроводы, как было указано в § 6 (рис. 24).

Для однофазных трансформаторов напряжения более целесообразно применение магнитопровода броневого

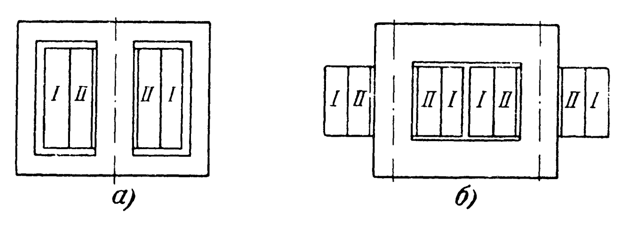


Рис. 23. Однофазные магнитопроводы.
а — броневой (с одним обмотанным стержнем); *б* — стержневой (с двумя обмотанными стержнями); *I* — первичная обмотка; *II* — вторичная обмотка.

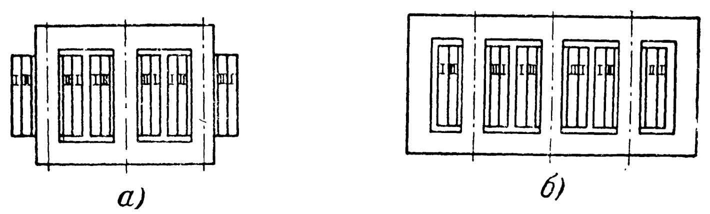


Рис. 24. Трехфазные магнитопроводы.
а — трехстержневой; *б* — пятистержневой (крайние стержни свободны от обмоток); *I* — первичная обмотка; *II* — вторичная обмотка.

типа, на одном из стержней которого расположена обмотка, так как при этом достаточно иметь лишь один комплект обмоток. Кроме того, выемная часть получается по форме более подходящей для помещения ее в круглый бак. В смысле расхода активных материалов при броневом магнитопроводе несколько увеличивается вес меди обмоток и уменьшается вес стали магнитопровода.

Для трехфазных двухобмоточных трансформаторов напряжения применяются обычно трехстержневые магнитопроводы. Для трехфазных трехобмоточных трансформаторов напряжения, имеющих дополнительную вторичную обмотку, служащую для питания цепей релейной защиты от заземления, как было указано в § 7, требуются пятистержневые магнитопроводы.

Магнитопроводы трансформаторов напряжения, как и всех других трансформаторов, во избежание чрезмерно больших потерь холостого хода изготовляются из пластин толщиной 0,35 и 0,5 *мм* специальной высоколегированной электротехнической стали. Согласно ГОСТ 802-58 для магнитопроводов применяется горячекатаная сталь марок Э41 и Э42 и холоднокатаная марок Э310, Э320 и Э330.

Холоднокатаная сталь имеет лучшую магнитную проницаемость в направлении вдоль прокатки листов и

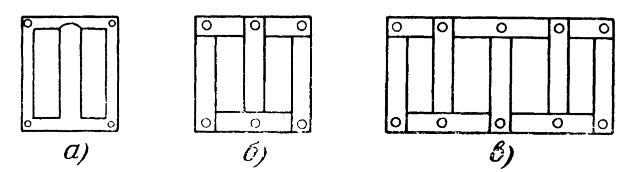


Рис. 25. Формы пластин и схема шихтовки магнитопровода трансформатора напряжения.

а — цельноштампованная пластина броневого однофазного магнитопровода; *б* — схема шихтовки однофазного броневого или трехфазного трехстержневого магнитопроводов; *в* — схема шихтовки трехфазного пятистержневого магнитопровода.

меньше потери мощности. Применение этой стали позволяет допускать более высокую индукцию в магнитопроводе, и поэтому магнитопроводы, изготовленные из холоднокатаной стали, имеют меньшие габаритные размеры и вес.

Для самых малых однофазных броневых магнитопроводов (для трансформаторов напряжения до 500 *в*) применяются цельноштампованные пластины из горячекатаной электротехнической стали, показанные на рис. 25,*а*. Для всех остальных однофазных и трехфазных магнитопроводов применяется шихтованная конструкция, при которой магнитопровод собирается (шихтуется) из отдельных прямоугольных пластин, как это видно на рис. 25,*б* и *в*.

Пластины стали предварительно изолируют путем оклеивания их бумагой или лакирования. Пластины самых малых магнитопроводов отжигают. Пленка окиси, образующаяся при отжиге (так называемая о к а л и н а), служит достаточной изоляцией пластин.

Пакеты пластин магнитопровода стягиваются по углам шпильками, которые изолируются от пластин по-

средством надевания на них бумажно-бакелитовых трубок или обертывания их кабельной бумагой. Шпильки пропускаются через отверстия, которые штампуются в пластинах.

Сечение стержня броневого магнитопровода, собранного из цельноштампованных пластин, имеет прямоугольную форму, при этом и обмотка, в которую зашихтовываются пластины, также имеет прямоугольную форму, как показано на рис. 26.

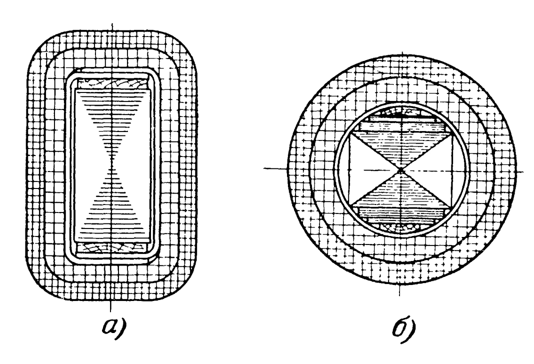


Рис. 26. Форма сечения стержней магнитопровода.
а — прямоугольная (для броневого однофазного магнитопровода из цельноштампованных пластин); *б* — ступенчатая (для шихтованных магнитопроводов).

Трансформаторы с шихтованным магнитопроводом на напряжение свыше 500 *в* имеют обмотки ВН с большим числом витков тонкого провода; такие обмотки целесообразно выполнять цилиндрической формы. Поэтому у шихтованных магнитопроводов сечение стержней имеет ступенчатую форму, вписанную в окружность. Ступенчатое сечение стержня увеличивает заполнение сталью пространства внутри цилиндрической катушки, как видно на рис. 26,*б*.

Кроме описанных выше конструкций магнитопроводов, при изготовлении однофазных трансформаторов малой мощности напряжением до 500 *в* в последнее время применяются спиральные или витые магнитопроводы. Эти магнитопроводы изготовляются путем навивки ленточной стали на оправку с последующим разрезанием либо на двухвитковые элементы, как показано на рис. 27,*а*, вкладываемые затем в обмотку, как изображе-

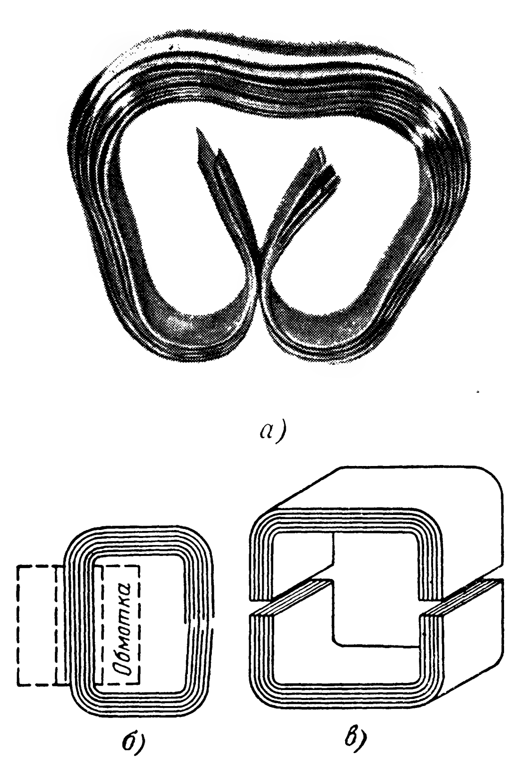


Рис. 27. Спиральные магнитопроводы.

а — разрезанные на двухвитковые элементы, подготовленные к вкладыванию в обмотку; *б* — то же в собранном виде; *в* — разрезанные на две С-образные части.

но на рис. 27,*б*, либо разрезанием на две С-образные части (рис. 27,*в*). В последнем случае магнитопровод должен быть склеен или погружением в склеивающий состав, или после предварительного нанесения склеивающего слоя на ленту. Такая конструкция позволяет значительно снизить ток холостого хода и при С-образных магнитопроводах механизировать и автоматизировать процесс сборки трансформаторов.

15. ОБМОТКА

а) Общие сведения

Обмотки первичного и вторичного напряжений являются основной частью каждого трансформатора. От

правильной конструкции и качества изготовления обмотки зависит возможность получения надлежащих характеристик и надежность работы трансформатора.

Расчет и разработка конструкции обмоток заключаются в выборе типа обмотки и определении обмоточных данных — числа витков и размеров как обмоточных

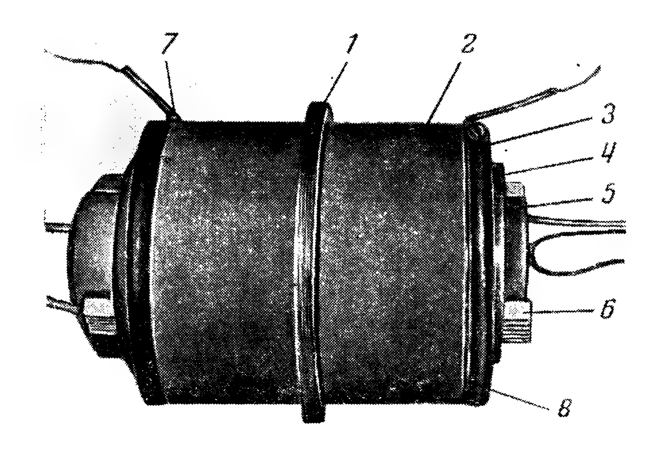


Рис. 28. Внешний вид обмотки трансформатора напряжения типа НОМ-35, 35 000/100 *в*.

1 — изолирующая шайба из электрокартона; *2* — обмотка ВН; сверху обмотки положен электростатический экран (показан также на рис. 48), забандажированный хлопчатобумажной лентой; *3* — емкостное кольцо; *4* — бумажно-бакелитовый цилиндр; *5* — обмотка НН; *6* — промежуточные рейки, склеенные из электрокартона; *7* — общий выводной конец (из гибкого провода) от обмотки ВН, электростатического экрана и емкостного кольца; *8* — бортик.

проводов, так и катушек, а также изоляционных цилиндров, барьеров и других деталей. Обмоточные данные должны быть выбраны в соответствии с электромагнитными, изоляционными и тепловыми характеристиками трансформатора.

При выборе типа обмотки руководствуются также технологической возможностью ее выполнения и наименьшими производственными затратами при ее изготовлении.

Обмотка состоит из обмоточного провода и изоляционных деталей. В комплект обмотки входят также ем-

костные кольца и электростатические экраны емкостной защиты от перенапряжений.

На рис. 28 показана обмотка трансформатора напряжения типа НОМ-35 (на 35 *кв*).

б) Обмоточный провод

Основным материалом для изготовления обмоток трансформаторов напряжения является изолированный медный обмоточный провод круглого или прямоугольного сечения.

Вследствие малых токов для трансформаторов напряжения применяется главным образом круглый обмоточный провод, размеры (диаметры) которого выбираются в соответствии с ГОСТ 6324-52 на обмоточные провода и ГОСТ 2773-51 на провод медный эмалированный. Для трансформаторов напряжения практически применяются провода диаметром от 0,2 до 4,1 *мм*.

Изоляция провода применяется различная в зависимости от диаметра провода, класса напряжения и конструкции обмотки трансформатора. Провода имеют различные марки в соответствии с их изоляцией.

Провода диаметром от 0,2 до 1,3 *мм* в большинстве случаев применяются марки ПЭЛ (*провод эмалированный, лакостойкий*) согласно ГОСТ 2773-51. Для обмоток ВН трансформаторов напряжения классов напряжения 110 *кв* и выше, которые должны иметь более высокую изоляцию, применяется провод марки ПЭЛШКО (*провод эмалированный, лакостойкий,* изолированный одним слоем пряжи из *шелка капрона*) по ГОСТ 6324-52. Для обмоток, заливаемых компаундом типа МБК-1, применяется провод марки ПЭВ-2 (*провод, изолированный* двумя слоями высокопрочной *винифлексовой эмали*, не растворимой в компаунде) по ГОСТ 7262-54.

Для круглых проводов диаметром 1,3 *мм* и более применяется марка ПБ (*провод, изолированный несколькими* слоями кабельной *бумаги*) по ГОСТ 6324-52. Прямоугольный обмоточный провод применяется марки ПББО (*провод, изолированный* кабельной *бумагой* и поверх нее *бумажной пряжей* в *один* слой в разгон). Сечения и размеры прямоугольного провода (толщина a и ширина b) сведены в таблицу ГОСТ 6234-52, причем активные сечения проводов, приводимых в таблице, немного меньше (на 0,3—0,9 *мм*^{2}) произведения $a \times b$. Это

уменьшение сечения вызвано небольшими закруглениями углов сечения, необходимых во избежание порчи витковой изоляции на этих углах.

в) Изоляционные детали и материалы

Для изготовления обмоток трансформаторов напряжения применяется большой ассортимент изоляционных материалов и полуфабрикатов.

Бумажно-бакелитовые цилиндры служат для наматывания на них обмоток и используются главным образом для обмоток ВН (первичных).

Электроизоляционный картон (прессшпан) марок ЭВ и ЭМЦ толщиной от 0,3 до 3 *мм* имеет весьма широкое применение; этот материал служит для изготовления цилиндров, шайб, реек, выравнивающих клиньев, прокладок, междуслойной изоляции, изоляции между сердечником и ярмом, барьеров и других деталей.

Кабельная бумага марки К-12 толщиной 0,12 *мм* предназначается для междуслойной изоляции, отбортованных цилиндров, изоляции стяжных шпилек и т. п.

Телефонная бумага марки КТН толщиной 0,05 *мм* используется для междуслойной изоляции и концевой изоляции (бортиков).

Лакоткань марки ЛШ1 толщиной 0,15 *мм* и марки ЛХМ толщиной 0,17 и 0,24 *мм* служит для усиления изоляции в местах паек, изолирования концов и отводов, а также поврежденных мест витковой изоляции обмоточного провода и т. п.

Для изолирования концов обмоток применяются электроизоляционные трубки, для масляных трансформаторов — линоксиновые марки ТБЛТ, а для сухих — полихлорвиниловые марки ТВ.

Бумажно-бакелитовые трубки служат для изоляции отводов обмоток.

Гетинакс электротехнический марок В и Г служит для изготовления досок зажимов сухих трансформаторов напряжения.

Хлопчатобумажная изоляционная киперная лента толщиной 0,45 *мм* и тафтяная толщиной 0,25 *мм* служат для крепления отдельных частей обмотки и ее бандажирования.

Хлопчатобумажный шнур (чулок) используется для изоляции концов обмоток НН (вторичных) и как кре-

нежный материал. Пластик древесный слоистый (дельта-древесина) электротехнический марки ДСП-Б-э служит для изготовления стоек, на которых устанавливаются остовы каскадных трансформаторов напряжения типа НКФ [1].

г) Типы обмоток. Слоевая обмотка

Из применяющихся типов обмоток для трансформаторов напряжения используются исключительно слоевые и катушечные обмотки.

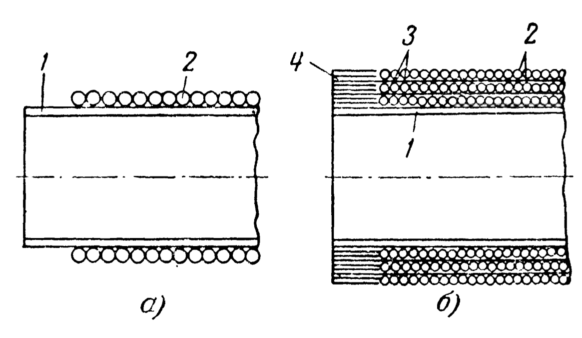


Рис. 29. Слоевые обмотки.

а — однослойная; *б* — многослойная; *1* — изоляционный цилиндр из электрокартона; *2* — обмоточный провод; *3* междуслойная изоляция из кабельной бумаги; *4* — концевая изоляция.

Слоевая обмотка является наиболее простой по выполнению.

Если слоевая обмотка изготовляется из круглого провода, то она наматывается на изоляционный (бумажно-бакелитовый или из электрокартона) цилиндр в один, два или много слоев, как это показано на рис. 29,*а* и *б*.

Как видно из рис. 29, в многослойной обмотке между слоями проводов прокладывается кабельная бумага *3*, причем слои провода не доходят до края цилиндра. Образующееся свободное место заполняется полосками (бортиками) *4* из электрокартона (концевая изоляция).

Катушки прямоугольного сечения наматываются на

---

[1] Номера ГОСТ и ТУ на изоляционные детали и материалы указаны в приложении 3.

каркасе из электрокартона, составленного из двух П-образных стенок, как показано на рис. 30.

Концы обмоток выводятся либо тем же проводом, которым намотана обмотка, либо при круглом проводе диаметром менее 0,8 *мм* гибким многожильным проводом марки ПАМГ или ПЩН. Гибкий провод заводится

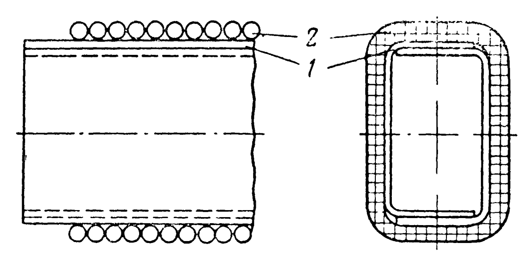


Рис. 30. Прямоугольная катушка, намотанная на каркасе из электрокартона.

1 —каркас; *2* — обмоточный провод.

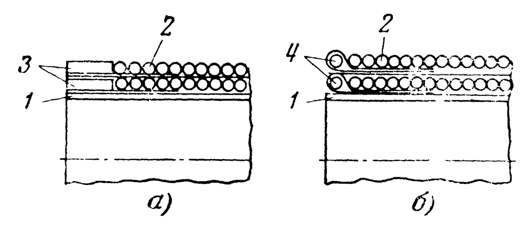


Рис. 31. Крепление крайних витков слоевой обмотки из круглого провода.

а — при помощи бортика; *б* — путем обертывания полоской из телефонной бумаги; *1* — изоляционный цилиндр; *2* — обмоточный провод; *3* — бортики из электрокартона; *4* — крайние витки, обернутые телефонной бумагой.

внутрь катушки на $^1/_4$ витка и припаивается к обмоточному проводу.

Крайние витки из круглого провода удерживаются от сползания с края цилиндра при помощи бортиков или путем обертывания их телефонной бумагой, как показано на рис. 31.

Бортик изготовляется из полосы электрокартона, приклеенной с одной стороны на более широкую полосу телефонной бумаги. Выступающая часть бумаги прижимается крайними витками, удерживая бортик от сползания.

При намотке прямоугольным проводом обмотка выполняется обычно без изоляционного цилиндра непосредственно на деревянном или стальном шаблоне, устанавливаемом на шпинделе обмоточного станка. Между слоями прямоугольного провода прокладывается электрокартон толщиною 0,3 или 0,5 *мм*.

Крепление крайних витков прямоугольного провода производится путем привязывания к ним киперной лентой выравнивающего кольца из электрокартона. При этом захватываются два-три крайних витка, как показано на рис. 32.

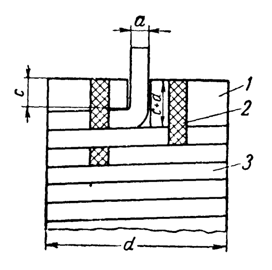


Рис. 32. Крепление крайних витков слоевой обмотки из прямоугольного провода.
1—выравнивающий клин (кольцо); 2 — киперная лента; 3 — провод.

Размеры выравнивающего кольца, как это можно видеть на рис. 32, будут равны: развернутая длина $\pi d - a$; ширина на одном конце c, на другом $c+a$, где a—ширина провода; c—высота конца выравнивающего кольца; d — диаметр обмотки.

Снаружи слоевая обмотка обычно бандажируется слоем киперной ленты.

Готовая обмотка масляных трансформаторов для механической прочности пропитывается глифталевым лаком ГФ-95, а сухих трансформаторов — противосыростным асфальтовым лаком № 447.

д) Направление намотки катушек

В § 12 указывалось, что группа соединения зависит от направления намотки катушек.

Возможны два направления намотки — л е в о е и п р а в о е.

Направление намотки однослойной катушки принято считать левой, если уклон ее витков совпадает с левой нарезкой болта, и соответственно правой, если совпадает с правой нарезкой. При левой намотке слоевой катушки, если смотреть с ее торца, провод от начала намотки проходит по катушке против часовой стрелки. Аналогичным образом в правой катушке провод от ее начала проходит по часовой стрелке. Это правило будет справедливо и для многослойной катушки, т. е. она будет называться л е в о й или п р а в о й по направлению намотки ее первого слоя.

Кстати можно отметить, что у многослойных катушек направление намотки нечетных и четных слоев чередуется. Например, если первый и все нечетные слои будут левыми, то все четные слои будут правыми; вся же катушка, как указывалось выше, будет левой.

При намотке слоевых катушек на обмоточном станке, если рабочее место обмотчика находится со стороны, противоположной барабану с обмоточным проводом, намотка слоя будет получаться левой, если начинать наматывание этого слоя катушки с левой стороны шаблона, и, наоборот, направление слоя будет правым, если начинать его наматывание с правой стороны. Намотка левых и правых катушек схематически показана на рис. 33.

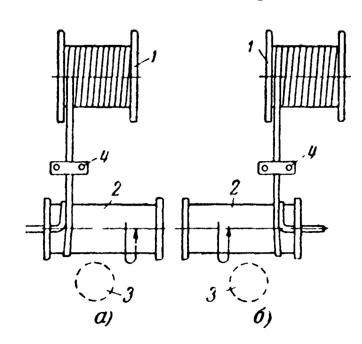


Рис. 33. Схемы намотки слоевых катушек.

а — левая по направлению намотки; *б* — правая по направлению намотки; *1* — барабан с проводом; *2* — шаблон; *3* — место рабочего-обмотчика; *4* — плашки для натяжения провода.

Обычно при отсутствии особых требований слоевые катушки изготовляются левыми, так как это несколько удобнее по технологическим соображениям.

е) Катушечная обмотка

При высоком напряжении слоевая обмотка, наматываемая тонким проводом, обладает существенным недостатком. В каждом слое укладывается большое число витков, что соответствует довольно высокому напряжению между слоями. Это требует увеличения толщины междуслойной изоляции. Однако простое увеличение числа слоев кабельной бумаги приводит к низкому коэффициенту заполнения окна магнитопровода и к слабой намотке катушек; последнее объясняется тем, что трудно осуществить хороший натяг тонким проводом и катушки получаются рыхлыми, т. е. механически непрочными.

В таких случаях слоевую обмотку разделяют в осевом направлении на несколько частей (катушек), и таким образом получается к а т у ш е ч н а я обмотка.

В катушечной обмотке число витков в слое, а сле-

довательно, и напряжение между слоями уменьшаются пропорционально числу катушек и, кроме того, намотка получается более плотной.

Соединять катушки между собой следует таким образом, чтобы соединение двух соседних катушек производилось либо их начальными (внутренними) витками, либо последними (наружными) витками. Таким образом

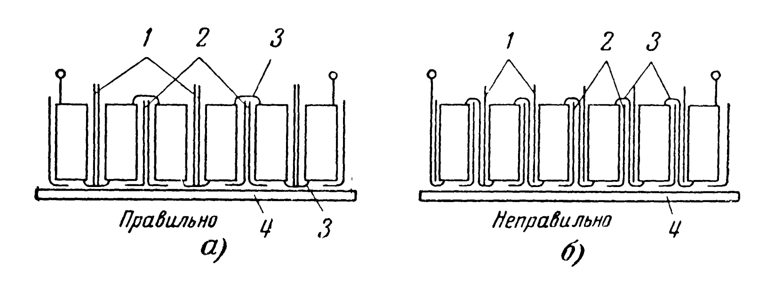


Рис. 34. Намотка катушечной обмотки.

а — правильное чередование и соединение катушек между собой; *б* — то же неправильное; *1* — промежуточные изоляционные шайбы из электрокартона; *2* — угловые шайбы (с отворотами, прилегающими к изоляционному цилиндру); *3* — соединительные провода; *4* — изоляционный цилиндр.

избегают того, чтобы соединяющий две катушки провод проходил мимо всех слоев этих катушек; этим предотвращается возможность пробоя изоляции между соединительным проводом и той или другой катушкой.

На рис. 34 показаны правильные и неправильные соединения катушек между собой.

Катушечная обмотка всегда наматывается проводом круглого сечения.

Намотка и соединение катушек на обмоточном станке производятся в следующем порядке (рис. 34,*а*).

Сначала производят л е в у ю намотку всех четных катушек. Затем снимают обмотку со станка, переворачивают и устанавливают на станок другим концом. После этого наматывают остальные (нечетные) катушки. Они также будут левыми. Перед намоткой каждой нечетной катушки ее начальный виток соединяется с начальным витком уже намотанной четной катушки посредством пайки. Такое перевертывание обмотки необходимо для того, чтобы, с одной стороны, обеспечить одинаковое на-

правление тока по виткам всех катушек, а с другой стороны, избежать соединяющих две соседние катушки проводов (позиция 3, рис. 34,*б*), проходящих рядом со слоями этих катушек. При намотке катушек с «перевертыванием» обмотки, как разобрано выше, оба этих условия соблюдаются: все катушки получаются левыми и соединение соседних катушек производится проводами, не проходящими между катушками (позиция 3, рис. 34,*а*).

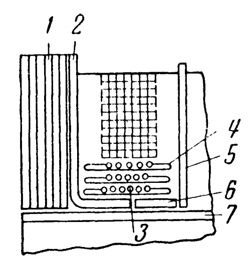


Рис. 35. Катушечная обмотка, крайняя катушка в разрезе.

1 — выравнивающее концевое кольцо из прессованного электрокартона; *2* — угловая шайба из электрокартона; *3* обмоточный провод; *4* — междуслойная изоляция из кабельной бумаги; *5* — промежуточная шайба из электрокартона; *6* — выравнивающая полоска из электрокартона; *7* — бумажно-бакелитовый цилиндр.

Угловые шайбы *2* (рис. 34,*а* и *б*) своими отворотами увеличивают путь электрического разряда (перекрытия) от одной катушки до другой. В этом месте, как это нетрудно видеть, напряжение, действующее на изоляцию, представляет сумму напряжений двух катушек.

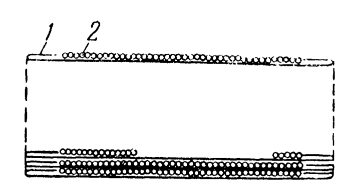
Снаружи катушки промежуточные шайбы *1* не имеют отворотов, так как для увеличения пути перекрытия достаточно увеличить наружный диаметр шайбы.

Все выпускаемые в настоящее время трансформаторы напряжения до 35 *кв* включительно имеют катушечные обмотки, состоящие из двух катушек. Однако такие обмотки трансформаторов напряжения прежних выпусков состояли и из большего числа (4—10 и более) катушек. Намотка их производилась сначала без перевертывания обмотки (рис. 34,*б*) и лишь впоследствии стала выполняться более совершенным способом с установлением обмотки на станок противоположным концом после окончания намотки всех четных катушек.

На рис. 35 схематически показана в разрезе крайняя катушка катушечной обмотки.

Обмотка наматывается на бумажно-бакелитовом цилиндре. Отвороты угловых шайб *2* выравниваются полосками *6* из электрокартона. Междуслойная изоляция выполняется из кабельной бумаги. Витки каждого слоя не доматываются до края на 5—6 *мм*. Во избежание их

сдвига или сползания края кабельной бумаги загибаются, образуя подобие бортика (рис. 36).



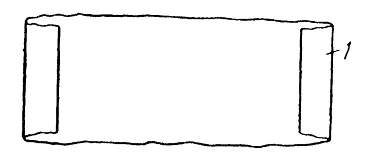


Рис. 36. Конструкция междуслойной изоляции катушечной обмотки.

1 — изоляция из кабельной бумаги с загнутыми краями; *2* — обмоточный провод.

16. ЗАЩИТА ОБМОТОК ОТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

Перенапряжениями называются воздействия на изоляцию трансформатора напряжений, значительно превышающих номинальное напряжение трансформатора и поэтому опасных для его изоляции. Наиболее сильно на изоляцию воздействуют импульсные перенапряжения, являющиеся следствием атмосферных явлений. Опасны также и коммутационные перенапряжения, возникающие в результате нестационарных режимов линий электропередач.

Трансформаторы напряжения в большинстве случаев с первичной (ВН) стороны присоединены к воздушным линиям электропередач, вследствие чего они могут подвергаться атмосферным перенапряжениям. Защиту от таких перенапряжений легче всего осуществить, создавая равномерное распределение импульса напряжения по первичной обмотке. В трансформаторах напряжения эта задача в значительной степени облегчается тем, что применяемые в них слоевые обмотки имеют между слоями практически равномерное распределение импульсного напряжения. Однако во избежание неравномерности распределения напряжения по виткам входных слоев они должны быть защищены **электростатическими емкостными экранами**, соединенными с линейными вводами. Таким образом, обмотки ВН всех трансформаторов напряжения от 3 *кв* и выше имеют электростатические экраны, показанные на рис. 40, 48 и 49.

Электростатический экран представляет собой металлическую полосу, ширина которой равна высоте обмотки и охватывает обмотку с небольшим зазором между концами во избежание образования короткозамкнутого

витка. Экран присоединяется к выводному концу обмотки. Края экрана, изготовляемого обычно из алюминиевой фольги или тонкой листовой латуни или меди, представляют собой острые края, создающие электрические поля большой напряженности. Во избежание этого края экранов из алюминиевой фольги обертывают кабельной бумагой, а из листовой латуни — электрокартоном или предусматривают их закругления путем, например, припайки к ним толстой круглой проволоки.

У катушечной обмотки ВН на 35 *кв* (трансформаторы типа НОМ-35), кроме электростатических экранов, по торцам обмотки устанавливают емкостные кольца, показанные на рис. 28 и 48. Назначение колец заключается в создании более благоприятного электростатического поля между обмоткой и ярмом магнитопровода.

О защите от перенапряжений трансформаторов напряжения на 110 *кв* и выше, имеющих на первичной стороне каскадную схему обмоток, указано в § 19.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ОТДЕЛЬНЫХ ТИПОВ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ, ВЫПУСКАЕМЫХ ЭЛЕКТРОЗАВОДОМ

17. СУХИЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ

а) Типы трансформаторов

Сухие трансформаторы напряжения, т. е. трансформаторы с естественным воздушным охлаждением, изготовляются следующих типов:

однофазные — НОС-0,5; ОСБ-0,2; НОСК-3 и НОСК-6;

трехфазные — НТС-0,5.

Обозначения типов трансформаторов расшифровываются следующим образом:

1. Буквенная часть: НОС—напряжения, однофазный, сухой;
   ОСБ — однофазный, сухой, броневой;
   НОСК — напряжения, однофазный, сухой, комплектующий;
   НТС — напряжения, трехфазный, сухой.
2. Цифровая часть означает класс напряжения трансформатора (кроме специального типа ОСБ-0,2, где цифровая часть означает максимальную мощность в киловольт-амперах).

Трансформаторы напряжения типов НОС-0,5 и НТС-0,5 являются стандартными трансформаторами, изготовляемыми по ГОСТ

Трансформатор типа ОСБ-0,2 изготовляется на базе трансформатора типа НОС-0,5 по специальным техническим условиям и предназначен для судовых установок.

Трансформаторы типов НОСК-3 и НОСК-6 имеют одинаковые активные части с масляным трансформатором напряжения типа НОМ-6 (см. § 18), изготовляются по ведомственным техническим условиям и предназначены для комплектования распределительных ящиков; при установке внутрь ящиков они заливаются битумной массой.

б) Магнитопроводы

Магнитопроводы сухих трансформаторов напряжения изготовляются из электротехнической стали толщиной 0,5 *мм* марки Э42 по ГОСТ 802-58.

Магнитопроводы трансформаторов типов НОС-0,5 и ОСБ-0,2 собираются из цельноштампованных пластин горячекатаной электротехнической стали (рис. 37).

Рис. 37. Пластина магнитопровода трансформаторов напряжения типов НОС-0,5 и ОСБ-0,2.

Как уже упоминалось в § 14, пластины для улучшения их магнитных свойств после штамповки отжигаются. Слой окиси после отжига служит достаточной изоляцией пластин; поэтому пластины дополнительно не изолируются.

Для возможности зашихтовки в обмотку средний стержень пластины имеет рассечку. Пластины зашихтовываются в обмотку попеременно с обеих ее концов по 2—3 шт. одновременно.

Толщина пакета составляет 74 *мм*. Вес электротехнической стали 5,92 *кг*.

Трансформаторы типов НОСК-3 и НОСК-6 имеют броневой шихтованный магнитопровод, одинаковый для обоих типов и с такими же размерами, как и масляный трансформатор напряжения типа НОМ-6 (см. § 18). Сечение стержня магнитопровода имеет ступенчатую форму (для удобства установки круглых катушек). Ярма трансформатора имеют прямоугольное сечение. Пластины магнитопровода изолированы бумагой или лаком.

Размеры броневого магнитопровода трансформатора даны на рис. 38,*а* и в табл. 3. Буквенные обозначения размеров в табл. 3 соответствуют обозначениям на рис. 38.

Трансформатор типа НТС-0,5 имеет стержневой шихтованный магнитопровод со ступенчатым сечением стержней. Ярма имеют прямоугольную форму. Пластины оклеены бумагой или лакированы. Размеры магнитопровода даны на рис. 38,*в* и в табл. 3.

в) Обмотки

Обмотки ВН и НН трансформаторов типов НОС-0,5, ОСБ-0,2 и НТС-0,5 и обмотки НН трансформаторов типов НОСК-3 и НОСК-6 выполняются многослойными, обмотки ВН трансформато-

Размеры магнитопроводов сухих и масляных

Графа	Рисунок	Тип трансформатора	Линейные						
			D	H	МО	МБ	А	В	h_1
1	37	НОС-0,5 ОСБ-0,2	—	118	—	88	120	150	16
2	38, *а*	НОМ-6 НОСК-3 НОСК-6	60	138	—	140	196	194	28
3	38, *а*	НОМ-10	70	170	—	180	236	226	28
4	38, *б*	НОМ-15	70	180	165	—	231	292	56
5	38, *а*	НОМ-35	85	365	—	305	373	433	34
6	38, *а*	ЗНОМ-15	70	170	—	216	272	226	28
7	38, *а*	ЗНОМ-20	70	200	—	216	272	256	28
8	38, *а*	ЗНОМ-35-54	90	275	—	325	395	345	35
9	38, *а*	НОК-6	60	92	—	150	206	148	28
10	38, *в*	НТС-0,5	55	85	100	—	252	175	45
11	38, *в*	НТМК-6-48	55	140	120	—	292	230	45
12	38, *в*	НТМК-10	70	180	160	—	381	292	56
13	38, *г*	НТМИ-6	60	175	140	165	535	265	45
14	38, *г*	НТМИ-10	70	250	155	188	602	354	52
15	38, *г*	НТМИ-18	70	275	195	228	722	379	52

Таблица 3

трансформаторов напряжения

размеры, *мм*									Активное сечение, *см*²		Вес стали, *кг*
b	b_1	b_2	b_3	b_4	C_1	C_2	C_3	C_4	стержня	ярма	
74	—	—	—	—	32	—	—	—	22,0	11,0	5,92
55	31	7	5	—	52	40	25	—	21,2	26,9	9,05
64	30	10,5	6,5	—	64	48	28	—	28,8	31,4	13,4
64	25	13,5	6	—	66	48	30	—	28,9	31,4	18,5
78	44	10	7	—	73	56	35	—	43,5	46,5	38,1
64	30	10,5	6,5	—	64	48	28	—	28,8	31,4	14,22
64	30	10,5	6,5	—	64	48	28	—	28,8	31,4	15,6
83	39	11	6	5	81	66	48	35	48,5	50,9	36,1
55	31	7	5	—	52	40	25	—	22,5	28,7	8,13
45	15	10	5	—	52	40	30	—	16,4	17,7	9,62
46	18	10	4	—	52	40	30	—	17,8	18,1	13,2
64	34	8,5	6,5	—	61	48	28	—	28,5	31,5	29,4
54	32	7	5,5	—	52	40	25	—	20,7	21,2	31,1
64	32	10	6	—	64	48	28	—	29,3	29,1	54,5
64	32	10	6	—	64	48	28	—	29,3	29,1	62,5

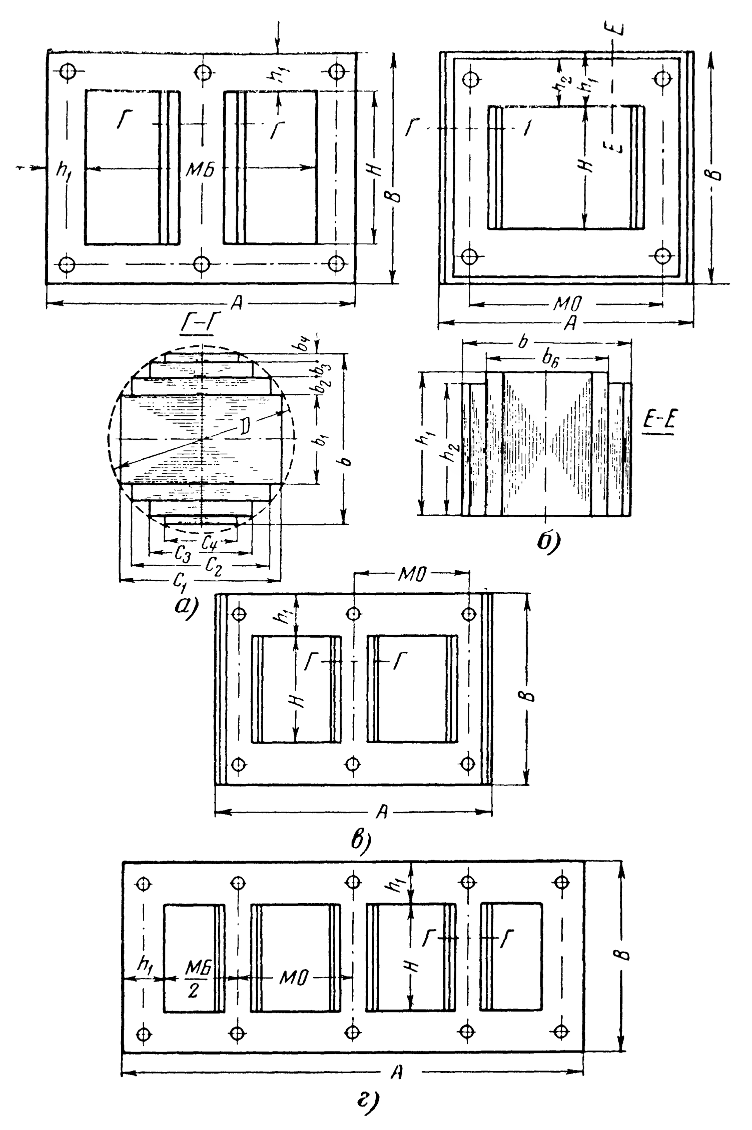


Рис. 38. Размеры и формы магнитопроводов, применяемых для трансформаторов напряжения (численные значения см. табл. 3 и 7). Формы магнитопроводов.

а — однофазный броневой; *б* — однофазный стержневой; *в* — трехфазный стрежневой; *г* — трехфазный пятистержневой.

ров типов НОСК-3 и НОСК-6 — катушечные, состоящие из двух соединенных последовательно катушек. Между слоями проводов проложена кабельная бумага толщиной 0,12 *мм*. Намотка катушечных обмоток описана в § 15.

Обмотки в готовом виде пропитываются асфальтовым лаком № 447. Обмотка трансформатора типа ОСБ-0,2, кроме того, покрывается эмалью марки СПД (серая, печной сушки, дугостойкая).

Обмотки трансформаторов типов НОС-0,5 и ОСБ-0,2 намотаны на прямоугольный каркас из электрокартона, состоящий из двух частей. Между обмотками ВН и НН также проложен электрокартон, как это показано на рис. 39.

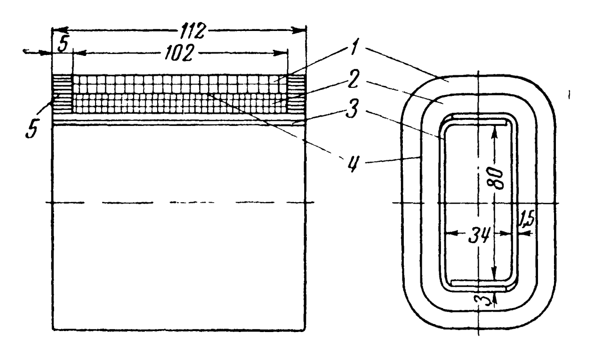


Рис. 39. Обмотка трансформаторов напряжения типов НОС-0,5 и ОСБ-0,2.

1 — обмотка НН (слоевая); *2* — обмотка ВН (слоевая); *3* — каркас из электрокартона, состоящий из двух частей; *4* — изоляция из электрокартона между обмотками ВН и НН; *5* — бортики из электрокартона, предохраняющие крайние витки слоев обмотки от сползания.

Концы обмоток выведены тем же обмоточным проводом, которым намотана обмотка, и изолированы линоксиновыми или полихлорвиниловыми трубками.

Общее строение обмоток трансформаторов типов НОСК-3 и НОСК-6 (а также НОМ-6 и НОМ-10, см. § 18) видно из продольного разреза обмотки (рис. 40).

Обмотка НН трансформаторов типов НОСК-3 и НОСК-6 многослойная, намотана на цилиндр *1*, склеенный из электрокартона толщиной 0,5 *мм*. Поверх обмотки НН наматывается второй цилиндр *4* из электрокартона толщиной 4 *мм* и затем еще кабельная бумага на толщину 1,5 *мм*. Края кабельной бумаги надрезаны и отогнуты под прямым углом так, что получается цилиндр *5* с отбортованными (отогнутыми) краями. На этот цилиндр намотаны две катушки ВН *8*, разделенные между собой двумя шайбами из электрокартона. По концам обмотки поверх второго цилиндра надеты выравнивающие (концевые) шайбы *6* из электрокартона.

Обмотки трансформатора напряжения типа НТС-0,5 слоевые; они намотаны на круглый цилиндр, склеенный из электрокартона. Между обмотками ВН и НН имеется промежуток шириной 1,5 *мм*, также заполненный электрокартоном.

Таблица 4

Обмоточные данные сухих трансформаторов напряжения

Тип трансформатора	Обмотка	Тип обмотки	Напряжение, *в*	Число витков	Обмоточный провод	
					Диаметр, *мм*	Марка
НОС-0,5	НН ВН ВН	Слоевая " "	100 380 500	215 814 1 070	1,16 0,64 0,59	ПЭЛ ПЭЛ ПЭЛ
ОСБ-0,2	НН ВН ВН ВН	Слоевая " " "	127 220 380 500	275 474 818 1 076	1,08 0,86 0,64 0,59	ПЭЛ ПЭЛ ПЭЛ ПЭЛ
НОСК-3	НН ВН	Слоевая Катушечная	100 3 000	189 5 642 = =5 638 + +4	1,12 0,29 0,74*	ПЭЛ ПЭЛ ПЭЛ
НОСК-6	НН ВН	Слоевая Катушечная	100 6 000	189 11 280= =11 276+ +4	1,12 0,2 0,74*	ПЭЛ ПЭЛ ПЭЛ
НТС-0,5	НН ВН ВН	Слоевая " "	100 380 500	146 549+6** 721+8**	1,08 0,59 0,51	ПЭЛ ПЭЛ ПЭЛ
НОК-6	НН ВН	Слоевая "	100 6 000	184 10 968= =10 808+ +160	1,12 0,2 0,64*	ПЭВ-2 ПЭВ-2 ПЭВ-2

* Концевые витки катушек, имеющие усиленное сечение обмоточного провода, для увеличения механической прочности выводных концов катушек.

** Компенсирующие витки для угловой коррекции.

Общее строение этих обмоток сходно со структурой обмотки трансформатора типа НОС-0,5 (рис. 39) и отличается от нее лишь тем, что обмотки трансформатора НТС-0,5 наматываются на цилиндр вместо каркаса.

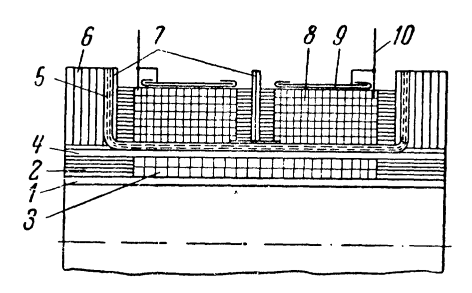


Рис. 40. Строение обмоток трансформаторов напряжения типов НОСК-3, НОСК-6, НОМ-6 и НОМ-10.

1 — цилиндр из электрокартона толщиной 1,5 *мм*; *2* — бортики; *3* — обмотка НН; между слоями проводов проложена кабельная бумага; *4* — цилиндр из электрокартона толщиной 4 *мм* при 3 и 6 *кв* и 6 *мм* при 10 *кв*; *5* — отбортованный цилиндр из кабельной бумаги, показанный на рис. 41; *6*—концевые шайбы из электрокартона; *7*— промежуточные и крайние шайбы из электрокартона; *8* — обмотка ВН; между слоями проводов проложена кабельная бумага с загнутыми краями (см. рис. 36, поз. *1*); *9* — электростатический экран; *10* — выводной конец обмотки ВН и экрана.

Обмотки трансформаторов типов НОСК-3, НОСК-6 и НТС-0,5 в готовом виде пропитываются асфальтовым лаком № 447.

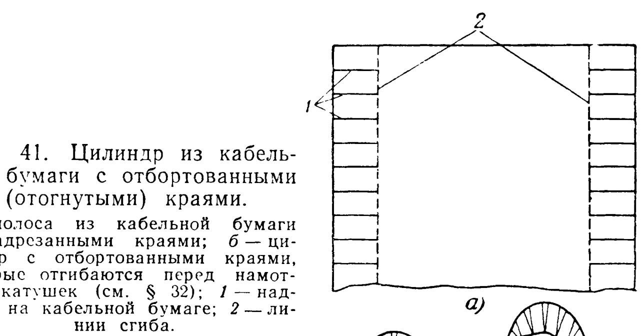
Обмоточные данные сухих трансформаторов напряжения приведены в табл. 4.

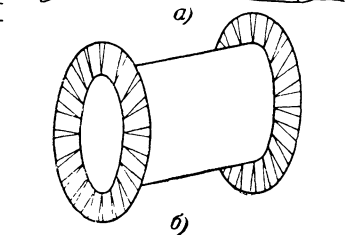
г) Детали конструкции

Магнитопровод и обмотки составляют основные части всякого трансформатора, в том числе и трансформатора напряжения. Но, кроме этих основных частей, трансформатор имеет еще и разного рода чисто конструктивные, вспомогательные части и детали, служащие для удобства его сборки и эксплуатации, как-то: крепления, различные детали сборки, угольники с лапами для крепления трансформатора, доски с зажимами для присоединения трансформатора к сети, бак с крышкой и вводами (для масляных трансформаторов) и др.

На рис. 42 показан общий вид трансформатора напряжения типа НОС-0,5 на класс напряжения 0,5 *кв*.

Технологический процесс изготовления трансформатора протекает в такой последовательности. Обмотки насаживаются на стержни магнитопроводов. У трансформаторов типов НОС-0,5 и ОСБ-0,2 штампованные пластины магнитопровода зашихтовываются внутрь обмотки (см. § 25,*б*). Затем обмотки укрепляются на стержнях путем расклинивания их деревянными клиньями (планками) *3*. Одновременно с этим спрессовываются и стержни магнитопровода. Сна-





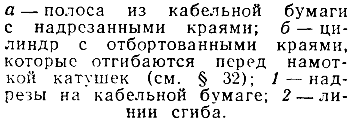


Рис. 41. Цилиндр из кабельной бумаги с отбортованными (отогнутыми) краями.

а — полоса из кабельной бумаги с надрезанными краями; *б* — цилиндр с отбортованными краями, которые отгибаются перед намоткой катушек (см. § 32); *1* — надрезы на кабельной бумаге; *2* — линии сгиба.

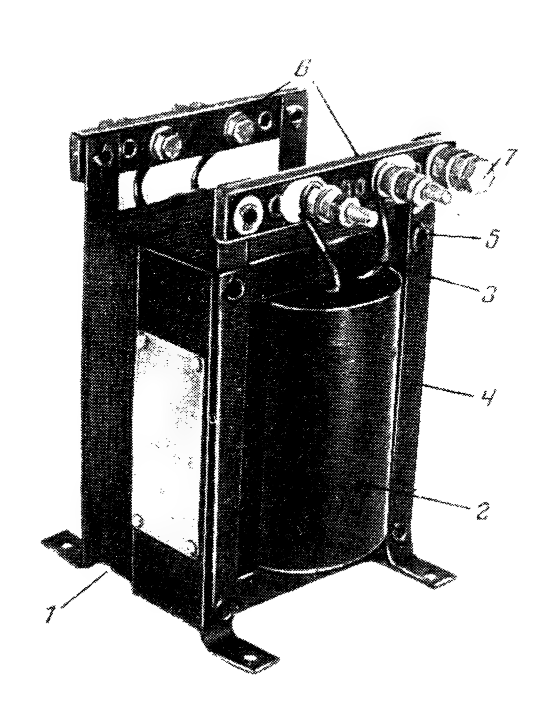


Рис. 42. Общий вид трансформатора напряжения типа НОС-0,5, 500/100 *в*.

1 — магнитопровод; *2* — слоевая обмотка; *3* — деревянный клин; *4* — прессующий угольник с лапами для крепления; *5* — стяжная развальцованная трубка; *6* — доска зажимов; *7* — болт заземления.

ружи магнитопровод стягивается прессующими планками или угольниками *4* при помощи шпилек или развальцованных трубочек *5*, пропущенных через отверстия магнитопровода. Стяжные шпильки изолированы кабельной бумагой.

Прессующие угольники имеют внизу лапы с отверстиями для крепления трансформатора на месте установки.

В верхней части трансформаторов типов НОС-0,5, ОСБ-0,2 и НТС-0,5 на угольниках крепятся доски зажимов *6*, изготовленные из гетинакса. Около контактных болтов на досках выгравированы обозначения выводных концов: *А*, *Х*, *а* и *х* — у однофазных трансформаторов и *А*, *В*, *С*, *О*, *а*, *b* и *с* — у трехфазных трансформаторов. Прописные буквы обозначений относятся к первичной обмотке (ВН), а строчные — к вторичной (НН). Кроме того, на каждой доске выгравировано номинальное напряжение обмотки в вольтах. Для большей отчетливости обозначения залиты белой эмалью.

У трансформаторов типов НОСК-3 и НОСК-6 доски зажимов отсутствуют. Обмотки этих трансформаторов имеют свободные выводные концы из гибкого провода, на которых укреплены металлические бирки с обозначениями соответствующих концов обмоток.

На каждом трансформаторе прикреплен заводской щиток с основными техническими данными трансформатора.

Трансформаторы типов НОС-0,5, ОСБ-0,2 и НТС-0,5 имеют болты заземления *7* (рис. 42) с резьбой М8, снабженные табличкой с надписью «земля» или стандартным знаком заземления. Трансформаторы типов НОСК-3 и НОСК-6 специальных болтов заземления не имеют. Их магнитопроводы заземляются через болтовые крепления.

Все трансформаторы напряжения, за исключением трансформаторов типа НОСК, окрашены снаружи в серый цвет, кроме досок зажимов и фирменных щитков. Трансформаторы типа НОСК имеют черную окраску под цвет лака № 447, которым пропитаны эти трансформаторы.

18. МАСЛЯНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ

а) Типы трансформаторов

Масляные трансформаторы, т. е. трансформаторы с естественным масляным охлаждением, выпускаются следующих типов:

однофазные — НОМ-6, НОМ-10, НОМ-15, НОМ-35, ЗНОМ-15, ЗНОМ-20 и ЗНОМ-35-54;

трехфазные — НТМК-6-48, НТМК-10, НТМИ-6, НТМИ-10 и НТМИ-18.

Обозначения типов трансформаторов расшифровываются следующим образом:

1. Буквенная часть: НОМ — напряжения, однофазный, масляный;

ЗНОМ — заземляемый ввод ВН, напряжения, однофазный, масляный;

НТМК — напряжения, трехфазный, масляный, с компенсирующей обмоткой;

НТМИ — напряжения, трехфазный, масляный, пятистержневой для контроля изоляции сети.

2. Цифровая часть: первое число означает класс напряжения, а второе число у некоторых типов — год разработки типа.

На рис. 43 представлена активная часть однофазного трансформатора напряжения типа НОМ-15, а на рис. 44 показан общий вид трехфазного трансформатора напряжения типа НТМИ-18.

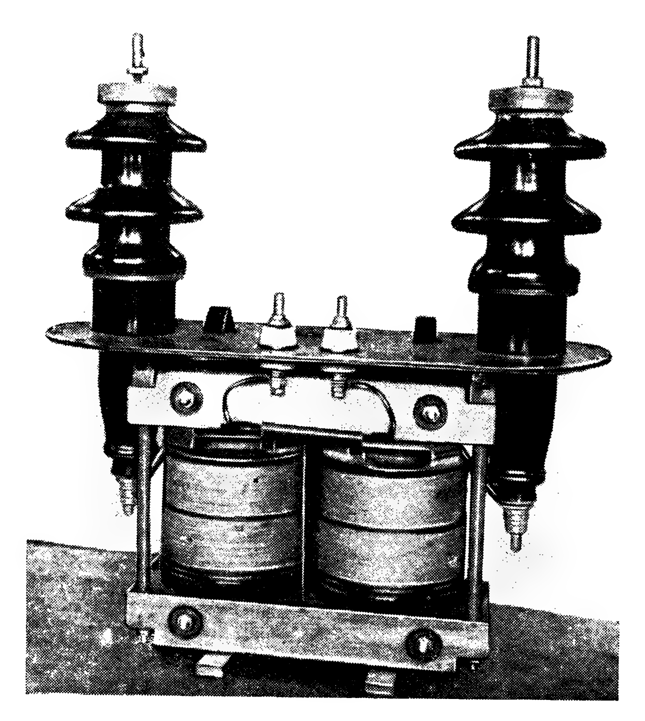


Рис. 43. Активная часть однофазного трансформатора напряжения типа НОМ-15.

Трансформаторы напряжения на 35 *кв* (НОМ-35 и ЗНОМ-35-54) предназначены для наружной установки, остальные типы — для внутренней.

Масляные трансформаторы напряжения перечисленных выше типов являются стандартными трансформаторами, изготовляемыми согласно ГОСТ. В некоторых случаях трансформаторы напряжения этих типов изготовляются по ведомственным техническим условиям на напряжения, не предусмотренные ГОСТ.

б) Магнитопроводы

Магнитопровод однофазного трансформатора типа НОМ-15 выполняется двухстержневым с обмотками на каждом стержне, а ос-

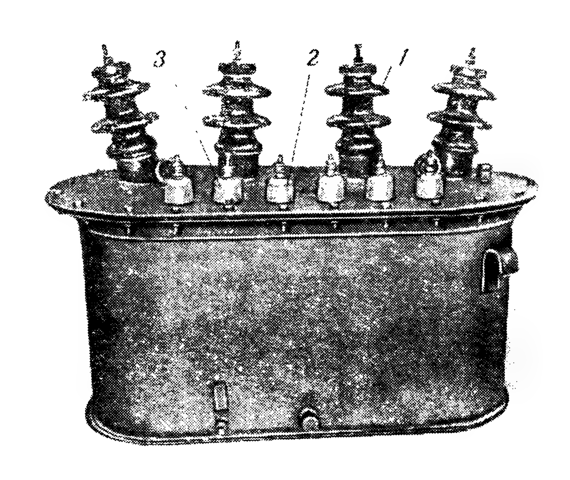


Рис. 44. Общий вид трехфазного пятистержневого трансформатора напряжения типа НТМИ-18.

1 — вводы ВН; *2* — четыре ввода основной обмотки НН; *3* — два ввода дополнительной обмотки НН.

тальные однофазные трансформаторы имеют магнитопроводы броневого типа.

Трехфазные трансформаторы типа НТМК имеют трехстержневые магнитопроводы, а типа НТМИ — пятистержневые с обмотками на трех стержнях.

Сечение стержней имеет ступенчатую форму, а сечение ярма — прямоугольную.

Пластины магнитопроводов изолированы бумагой или лаком.

Размеры магнитопроводов указаны на рис. 38 и в табл. 3.

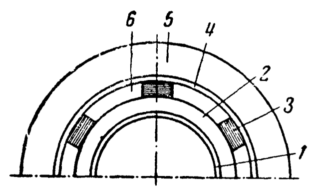


Рис. 45. Строение обмотки трансформатора напряжения типа НОМ-15 (вид с торца обмотки).

1 — цилиндр обмотки НН из электрокартона; *2*—обмотка НН (слоевая); *3* — планка, склеенная из электрокартона; *4* — цилиндр обмотки ВН из электрокартона; *5* — обмотка ВН (катушечная); *6* — канал.

в) Обмотки

Строение обмоток однофазных трансформаторов типов НОМ-6, НОМ-10, НОМ-15 и трехфазных — типов НТМК и НТМИ аналогично строению обмотки трансформаторов типов НОСК, показанной на рис. 40

Обмотка трансформатора типа НОМ-15 несколько отличается тем, что между обмотками НН и ВН сделан канал при помощи планок, склеенных из электрокартона, как это видно на рис. 45.

У обмоток ВН трансформаторов типа НТМК поверх одной из катушек каждой фазы намотаны корректирующие витки (компенсационная обмотка), служащие для коррекции угловой погрешности (см. § 11).

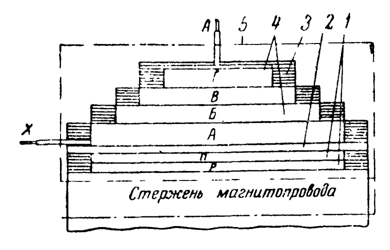


Рис. 46. Обмотка трансформатора напряжения типа ЗНОМ-35-54 в разрезе.

1 — обмотка НН—П и Р; *2* — цилиндр из электрокартона; *3* — концевая изоляция катушек ВН; *4* — обмотка ВН, состоящая из четырех катушек *А*, *Б*, *В* и *Г*; катушки большего диаметра, как имеющие больший потенциал, имеют меньшую длину для увеличения изоляционного расстояния до ярма; *5* — контуры окна магнитопровода.

Обмотка ВН трансформаторов типа НТМИ состоит лишь из одной многослойной катушки

У трансформаторов типов ЗНОМ-15, ЗНОМ-20 и ЗНОМ-35-54 обмотки ВН и НН слоевые, намотанные одна поверх другой. Обмотка ВН благодаря тому, что один ее выводной конец (*X*) во время работы трансформатора заземляется, может иметь пониженную изоляцию относительно обмотки НН и корпуса со стороны заземляемого конца. Принципиальная схема обмотки типа ЗНОМ дана на рис. 4. В связи с этим для большего выигрыша места в окне магнитопровода обмотку ВН выполняют с распределенной (координированной) ярмовой изоляцией. Обмотка ВН в своем сечении имеет четырехступенчатую форму, как это видно на рис. 46 и 47. По мере увеличения напряжения

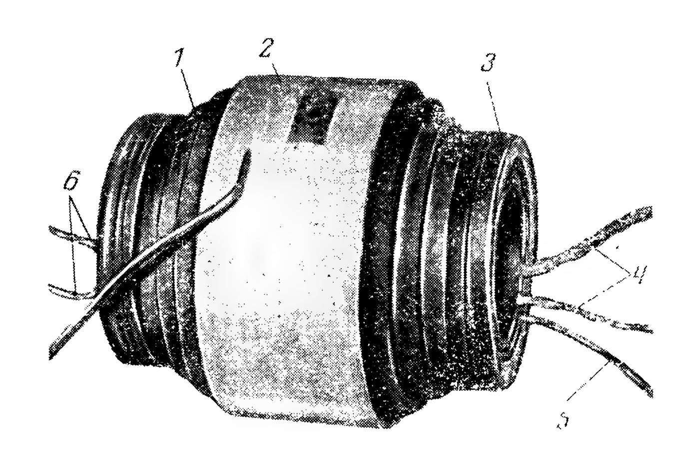


Рис. 47. Внешний вид обмотки трансформатора напряжения типа ЗНОМ-35-54.

1 — выводной конец *А* обмотки ВН и экрана; *2* — обмотка ВН слоевая ступенчатой формы; *3* — концевое кольцо из прессованного электрокартона; *4* — выводные концы *a* и *x* основной обмотки НН; *5* — заземляемый выводной конец *X* обмотки ВН; *6* — выводные концы $a_д$ и $x_д$ дополнительной обмотки НН.

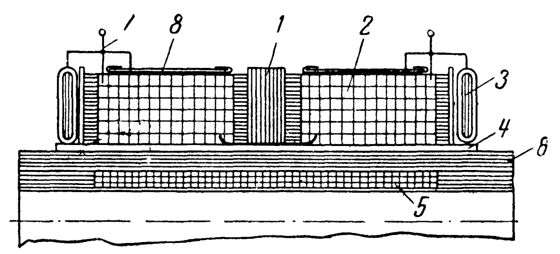


Рис. 48. Строение обмоток трансформатора напряжения типа НОМ-35.

1 — изолирующая шайба из электрокартона; *2* — обмотка ВН; *3* — емкостное кольцо; *4* — бумажно-бакелитовый цилиндр; *5* — обмотка НН; *6* — промежуточные рейки, склеенные из электрокартона; *7* — общий выводной конец (из гибкого провода) от обмотки ВН, емкостного кольца и электростатического экрана; *8* — электростатический экран (см. рис. 49).

между обмоткой и ярмом изоляционное расстояние обмотки от ярма увеличивается. Последний слой обмотки, имеющий наибольший потенциал по отношению к земле (последний виток присоединяется к линейному вводу *А*), имеет и наибольшее расстояние от ярма.

Продольный разрез обмоток трансформатора типа НОМ-35 показан на рис. 48. Обмотка ВН катушечная и состоит из двух катушек *2*. Для защиты от перенапряжений, как было сказано в § 16, катушки имеют сверху электростатические экраны *8* и, кроме того, по торцам обмотки устанавливаются емкостные кольца *3*. Емкостное кольцо представляет собой толстую шайбу, склеенную из электрокартона, обмотанную медной фольгой и затем изолированную кабельной бумагой.

Экран *5* показан на рис. 49. Он состоит из полосы алюминиевой фольги *1*, наклеенной на более широкую полосу из электрокартона *2*, края которой для уменьшения напряженности электрического поля у концов фольги загибаются. Экран накладывается вокруг каждой катушки, и на него обычно наматывается последний слой обмоточного провода увеличенного сечения для большей механической прочности. Вывод *3* от экрана выполняется тонкой (0,1—0,3 *мм*) плоской меди, которая для создания хорошего контакта с фольгой завертывается в нее с одного конца. Концы медной полоски удерживаются загнутыми краями электрокартона.

Электростатические экраны, емкостные кольца и концы обмотки ВН при-

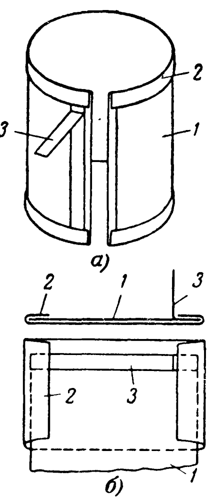


Рис. 49. Электростатический экран обмотки ВН трансформатора напряжения типа НОМ-35.

а — экран в собранном виде; *б* — укрепление вывода от экрана; *1* — полоса из алюминиевой фольги; *2* — то же из электрокартона с загнутыми краями; *3* — вывод от экрана из медной полосы.

Таблица 5

Обмоточные данные однофазных масляных трансформаторов напряжения

Тип трансформатора	Обмотка	Тип обмотки	Напряжение, *в*	Число витков	Обмоточный провод	
					Диаметр, *мм*	Марка
НОМ-6	НН	Слоевая	100	189	1,12	ПЭЛ
	ВН	Катушечная	2 100	3 950= = 3 946+ +4	0,35 0,74*	ПЭЛ ПЭЛ
	ВН	»	3 000	5 642= = 5 638+ +4	0,29 0,74*	ПЭЛ ПЭЛ
	ВН	»	6 000	11 280= = 11 276+ +4	0,2 0,74*	ПЭЛ ПЭЛ
НОМ-10	НН	Слоевая	100	135	1,81	ПБ
	ВН	Катушечная	10 000	13 416= = 13 404+ +12	0,2 0,74*	ПЭЛ ПЭЛ
НОМ-15	НН	Слоевая	100	142	2,1	ПБ
	ВН	Катушечная	13 800	19 478= = 19 388+ +90	0,2 0,74*	ПЭЛ ПЭЛ
	НН	Слоевая	100	142	1,45	ПБ
	ВН	Катушечаая	15 000	21 172= = 21 082+ +90	0,2 0,74*	ПЭЛ ПЭЛ

Продолжение табл. 5

Тип трансформатора	Обмотка	Тип обмотки	Напряжение, *в*	Число витков	Обмоточный провод	
					Диаметр, *мм*	Марка
	НН	Слоевая	100	142	2,1	ПБ
	ВН	Катушечная	18 000	25 398= = 25 308+ +90	0,2 0,74	ПЭЛ ПЭЛ
ЗНОМ-15	НН	Слоевая	$100:\sqrt{3}$	105	2,26	ПБ
	НН	„	100:3	61	2,83	ПБ
	ВН	„	$6\,000:\sqrt{3}$	6 260= = 6 152+ +108	0,35 0,74*	ПЭЛ ПЭЛ
	НН	Слоевая	$100:\sqrt{3}$	105	3,05	ПБ
	НН	„	100:3	61	3,53	ПБ
	ВН	„	$10\,000:\sqrt{3}$	10 420= = 10 312+ +108	0,31 0,74*	ПЭЛ ПЭЛ
	ВН	„	$13\,800:\sqrt{3}$	14 403= = 14 295+ +108	0,29 0,74*	ПЭЛ ПЭЛ
	ВН	„	$15\,000:\sqrt{3}$	15 616= = 15 508+ +108	0,29 0,74*	ПЭЛ ПЭЛ
	ВН	„	$18\,000:\sqrt{3}$	18 790= = 18 682+ +108	0,25 0,74*	ПЭЛ ПЭЛ

Продолжение табл. 5

Тип трансформатора	Обмотка	Тип обмотки	Напряжение, *в*	Число витков	Обмоточный провод	
					Диаметр, *мм*	Марка
ЗНОМ-20	НН НН ВН	Слоевая " "	$100:\sqrt{3}$ 100:3 $20\,000:\sqrt{3}$	105 61 20 874= = 20 766+ +108	3,05 3,53 0,2 0,74*	ПБ ПБ ПЭЛ ПЭЛ
НОМ-35	НН ВН	Слоевая Катушечная	100 35 000	83 28 820 = 28 690+ +130	2,44 0,2 0,74*	ПБ ПЭЛ ПЭЛБО
ЗНОМ-35-54	НН НН ВН	Слоевая " "	$100:\sqrt{3}$ 100:3 $35\,000:\sqrt{3}$	62 36 21 535= = 21 379+ +91+65	5,1×1,56 8×1,56 0,25 0,74*	ПББО ПББО ПЭЛ ПЭЛБО
	НН ВН	Слоевая "	127—100 27 500	136—107 29 201= = 28 958+ +243	2,44 0,2 0,74*	ПБ ПЭЛ ПЭЛБО

* Начальные и последние витки катушек выполнены из провода ⌀ 0,74.

Таблица 6

Обмоточные данные трехфазных масляных трансформаторов напряжения

Тип трансформатора	Обмотка	Тип обмотки	Напряжение, *в*	Число витков	Обмоточный провод	
					Диаметр, *мм*	Марка
НТМК-6-48	НН ВН	Слоевая Катушечная	100 3 000	124 3 678= =3 662+ +16 44**	1,56 0,25 0,74* 0,74	ПБ ПЭЛ ПЭЛ ПЭЛ
	НН ВН	Слоевая Катушечная	100 6 000	124 7 364= =7 348+ +16 70**	1,68 0,2 0,74* 0,74	ПБ ПЭЛ ПЭЛ ПЭЛ
НТМК-10	НН ВН	Слоевая Катушечная	100 10 000	75 7 424= =7 408+ +16 76**	1,95 0,2 0,74* 0,74	ПБ ПЭЛ ПЭЛ ПЭЛ
НТМИ-6	НН НН ВН ВН	Слоевая " " "	100 100:3 3 000 6 000	156 92 4 659= =4 643+ +16 9 304= =9 288+ +16	1,45 2×0,86 0,25 0,74* 0,2 0,74*	ПБ ПЭЛ ПЭЛ ПЭЛ ПЭЛ ПЭЛ
НТМИ-10	НН НН ВН	Слоевая " "	100 100:3 10 000	116 68 11 550= =11 518+ +32	2,1 1,74 0,2 0,74*	ПБ ПБ ПЭЛ ПЭЛ

* Концевые витки катушек ВН из провода ⌀ 0,74.
** Компенсирующие витки.

Тип трансформатора	Обмотка	Тип обмотки	Напряжение, *в*	Число витков	Обмоточный провод	
					Диаметр, *мм*	Марка
НТМИ-18	НН	Слоевая	100	116	2,1	ПБ
	НН	»	100:3	69	1,74	ПБ
	ВН	»	13 800	15 936= =15 904+ +32	0,25 0,74*	ПЭЛ ПЭЛ
	ВН	»	15 000	17 322= =17 290+ +32	0,2 0,74*	ПЭЛ ПЭЛ
	ВН	»	18 000	20 786= =20 754+ +32	0,2 0,74*	ПЭЛ ПЭЛ

соединены общими выводными концами 7 (рис. 48) к вводам *А* и *Х*.

Обмотки трансформаторов типов НОМ-15, НОМ-35, ЗНОМ-15, ЗНОМ-20, ЗНОМ-35-54 и НТМИ-18 пропитываются глифталевым лаком ГФ-95 (ГОСТ 8018-56).

Обмоточные данные масляных трансформаторов напряжения приведены в табл. 5 и 6.

г) Детали конструкции

Стержни магнитопроводов спрессовываются при помощи деревянных клиньев, одновременно укрепляющих обмотку. Ярма магнитопроводов стянуты деревянными планками или стальными угольниками посредством шпилек, пропущенных через отверстия в углах магнитопровода. Стяжные шпильки изолированы кабельной бумагой.

Прессующие угольники или планки имеют в верхней части лапы с отверстиями, при помощи которых активная часть трансформатора (магнитопровод с обмотками) крепится к крышке бака (рис. 43).

Активная часть трансформатора опускается затем в бак с маслом. Уровень масла в баке для трансформаторов напряжения до 18 *кв* включительно находится на расстоянии 15—30 *мм* ниже крышки. Остающееся воздушное пространство дает возможность свободного расширения масла при повышении его температуры.

У трансформаторов напряжения 35 *кв* бак должен быть залит маслом полностью до крышки для того, чтобы нижняя часть фарфоровых вводов ВН была целиком погружена в масло. Ввод ВН также должен быть заполнен маслом.

Компенсация колебания уровня масла для этих трансформаторов производится в маслорасширителе. У трансформатора типа НОМ-35, имеющего два ввода ВН, расширитель установлен на крышке бака отдельно, примерно на высоте середины наружной части вводов ВН. Так как внутренние полости вводов сообщаются

* Концевые витки катушек ВН из провода ∅ 0,74.

с баком, то вводы ВН залиты маслом неполностью, т. е. до уровня масла в расширителе. У однополюсного трансформатора типа ЗНОМ-35-54 расширитель установлен на вводе ВН и благодаря этому ввод заполнен маслом полностью, так как сообщение расширителя с баком производится через этот ввод. Отсутствие самостоятельного расширителя придает трансформатору ЗНОМ-35-54 более компактный вид, как это видно на рис. 50.

Баки трансформаторов напряжения свариваются из листовой стали, причем у трансформаторов типов ЗНОМ-15 и ЗНОМ-20 баки должны быть изготовлены из немагнитной стали. Необходимость применения немагнитной стали вызвана тем, что эти трансформаторы устанавливаются в непосредственной близости от шинопроводов крупных генераторов, благодаря чему они находятся в пределах сильного магнитного поля рассеяния. Баки, изготовленные из обычной стали, имели бы в этих условиях недопустимо высокую температуру.

Баки трансформаторов напряжения большей частью выполняются цилиндрическими. Исключение составляют трансформаторы типов НОМ-15 и НТМИ-18 с овальными баками и трансформаторы ЗНОМ-15 и ЗНОМ-20, баки которых имеют прямоугольную форму.

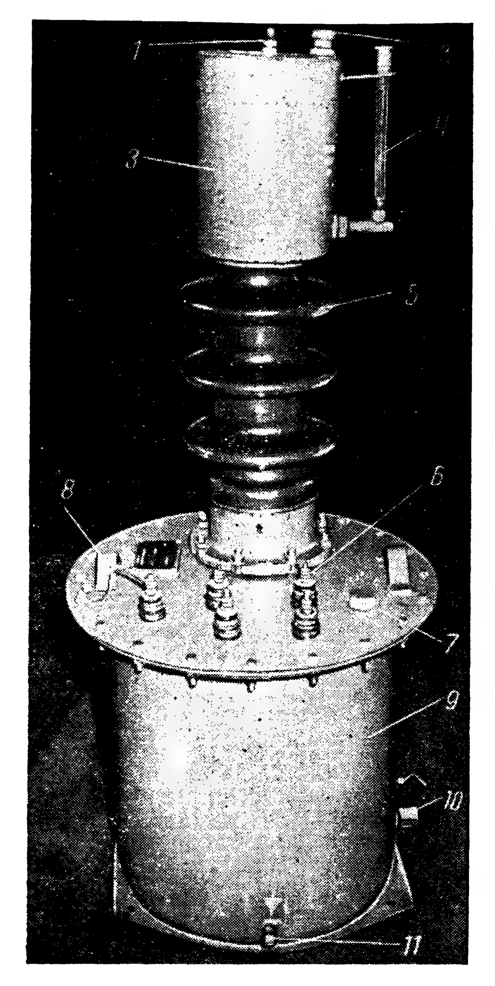


Рис. 50. Внешний вид однофазного трансформатора напряжения типа ЗНОМ-35-54.

1 — ввод ВН; *2* — пробка для доливки масла; *3* — расширитель; *4* — маслоуказатель; *5* — изолятор фарфоровый; *6* — вводы НН; *7* — пробка для заливки масла; *8*—подъемные скобы; *9* — бак; *10* — пробка для спуска масла; *11* — болт для заземления.

В нижней части бака, кроме баков трансформаторов типов НОМ-6 и НОМ-10, имеется пробка для спуска и взятия пробы масла. Все сварные швы баков во избежание течи должны быть выполнены маслоплотными.

Выводные концы обмоток масляных трансформаторов напряжения присоединены к проходным фарфоровым изоляторам, установленным на крышке бака. Только у трансформаторов типов ЗНОМ-15 и ЗНОМ-20 фарфоровые вводы НН установлены на боковой стенке бака.

Кроме изоляторов, на крышке бака имеются: пробка для заливки масла и «дыхания» трансформатора, щиток и скобы для подъема трансформатора (кроме типов НТМИ-10 и НТМИ-18). Для подъема трансформаторов типов НТМИ-10 и НТМИ-18 ввиду их относительно большого веса (190 и 300 *кг*) к стенкам бака приварены крюки. Имеющиеся на крышках этих трансформаторов подъемные скобы у трансформаторов типа НТМИ-10 или кольца у транс-

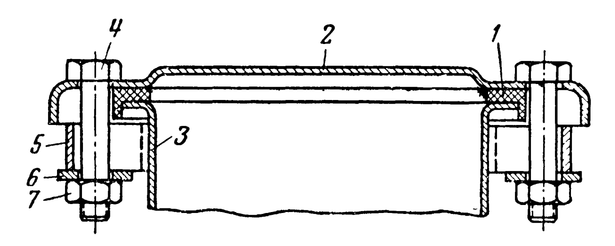


Рис. 51. Уплотнение крышки бака трансформаторов типов НОМ-6, НОМ-10 и НТМК-6-48.

1 — резиновое кольцо уплотнения; *2* — крышка; *3* — стенка бака с отогнутым наружу верхним краем; *4* — болт крепления; *5* — скоба, приваренная к стенке бака; *6* — шайба; *7* — гайка.

форматоров типа НТМИ-18 предназначены для подъема только их активных частей. Пробка для «дыхания» у трансформаторов типов НОМ-35 и ЗНОМ-35-54 установлена на маслорасширителях.

Крышка бака трансформаторов всех типов, кроме НОМ-6, НОМ-10 и НТМК-6-48, плоская, изготовляется из листовой стали толщиной 4 или 6 *мм*. Трансформаторы типов НОМ-6, НОМ-10 и НТМК-6-48 имеют выпуклую крышку толщиной 1,5 *мм*. Плоские крышки привертываются болтами к раме бака, изготовленной из полосовой стали, загнутой на ребро и приваренной к стенке бака. Рама и крышка имеют по окружности отверстия для болтового крепления. У трансформаторов типов НОМ-6, НОМ-10 и НТМК-6-48 верхние края стенки бака *3* отогнуты (отбортованы) наружу на ширину 10 *мм*, а для установки болтов крепления *4* на стенке бака приварены скобы *5*, как это показано на рис. 51.

Между рамой (или отогнутым верхним краем стенки) бака и крышкой прокладывается резиновое уплотнение в виде колец. Во избежание выпадения уплотнения внутрь бака рама приваривается таким образом, что стенка выступает сверх рамы на 2 *мм*.

Для уплотнения отбортованных баков применяется резиновое кольцо *1* Г-образного сечения, также показанного на рис. 51.

Заземление масляных трансформаторов напряжения осуществляется специальными болтами, приваренными внизу баков, кроме

типов НОМ-6 и НОМ-10, у которых болтом заземления служит один из болтов крепления крышки.

Болты заземления обозначены стандартным знаком заземления, выполненным красной или белой краской.

д) Вводы НН и ВН, применяемые для масляных трансформаторов напряжения

Размеры вводов (проходных фарфоровых изоляторов), применяемых для масляных трансформаторов напряжения, определяются в основном номинальным напряжением. Диаметры токопроводящих

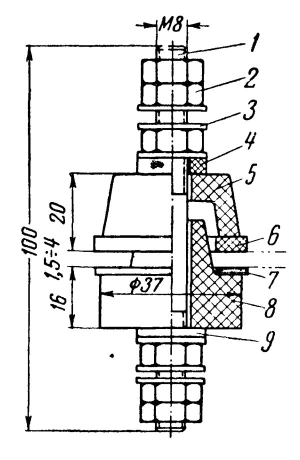


Рис. 52. Ввод НН 0,5 *кв* составной для внутренней установки.

1 — шпилька контактная; *2* — контргайка; *3* — шайба медная; *4*, *6* — шайбы резиновые; *5* — изолятор фарфоровый; *7*, *9* — шайбы из электрокартона; *8* — втулка фарфоровая.

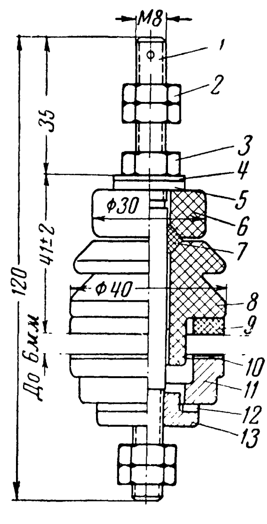


Рис. 53. Ввод НН 0,5 *кв* составной съемный для наружной установки.

1 — стержень контактный; *2* — контргайка; *3* — гайка; *4* — шайба медная; *5*, *10* и *12* — шайбы паранитовые; *6* — шайба фарфоровая; *7* — кольцо резиновое; *8* — изолятор фарфоровый; *9* — шайба резиновая; *11* — втулка фарфоровая; *13* — втулка латунная.

шпилек ввиду малых токов выбираются наименьшими допустимыми по механической прочности.

Ранее часто применялись вводы силовых трансформаторов. В связи с постепенным усовершенствованием конструкций трансформаторов напряжения и уменьшения их размеров для них были разработаны специальные малогабаритные вводы.

Для трансформаторов типов ЗНОМ-15 и ЗНОМ-20 применяются вводы ВН с ножевыми контактами. Для включения трансформатора в линию ножевой контакт должен врубаться в пружинный контакт шинопровода.

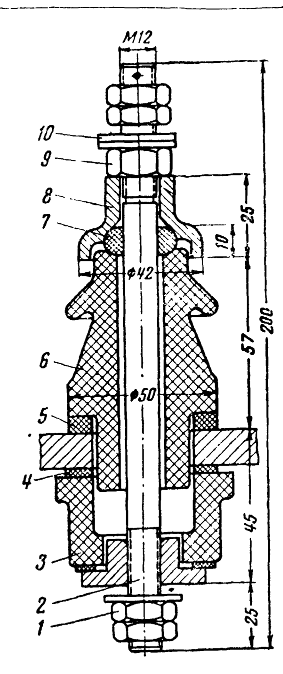


Рис. 54. Ввод НН 1 *кв* составной съемный для наружной установки.

1 — контргайка; *2* — стержень контактный; *3* — втулка фарфоровая; *4*, *5* — шайбы паранитовые; *6* — изолятор фарфоровый; *7* — кольцо резиновое; *8* — колпак алюминиевый; *9* — гайка; *10* — шайба медная.

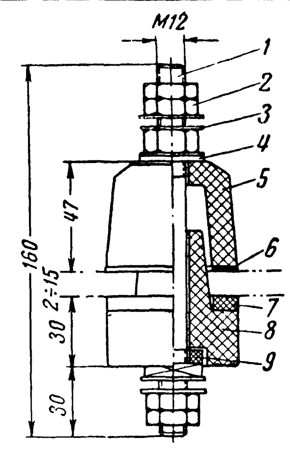
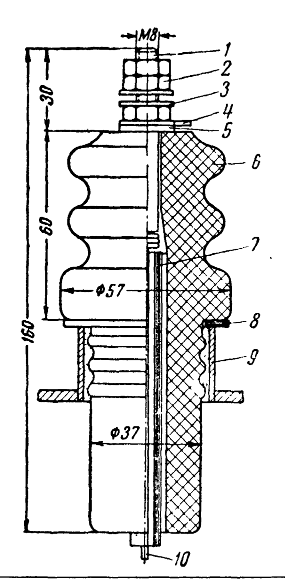


Рис. 55. Ввод НН 1 *кв* составной для внутренней установки.

1 — шпилька контактная; *2* — контргайка; *3* — шайба медная; *4*, *6* — шайбы из электрокартона; *5* — изолятор фарфоровый; *7*, *9* — шайбы резиновые; *8* — втулка фарфоровая

Рис. 56. Ввод ВН 6 *кв* армированный для внутренней установки.

1 — шпилька контактная; *2* — контргайка; *3* — шайба медная; *4* — шайба с меткой; *5* и *8* — шайбы из электрокартона; *6* — изолятор фарфоровый; *7* — трубка изоляционная; *9* — букса стальная; *10* — провод гибкий.



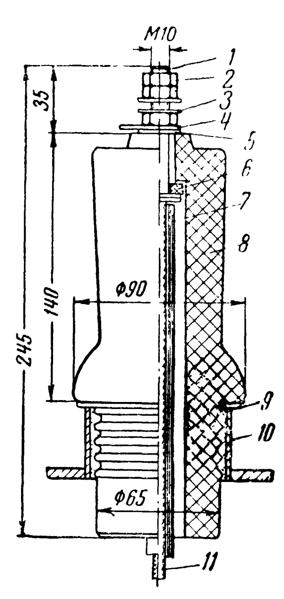


Рис. 57. Ввод ВН 10 *кв* армированный для внутренней установки.

1 — шпилька контактная; *2* — контргайка; *3* — шайба медная; *4* — шайба с меткой; *5*, *9* — шайбы из электрокартона; *6* — шайба резиновая; *7* — трубка изоляционная; *8* — изолятор фарфоровый; *10* — букса стальная; *11* — провод гибкий.

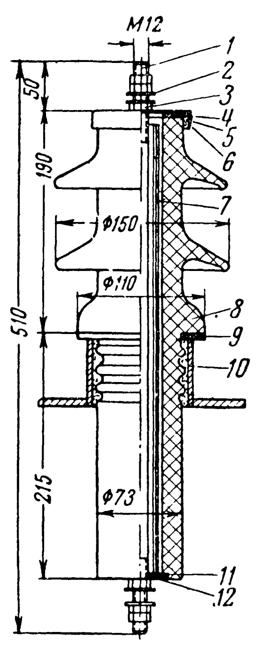


Рис. 58. Ввод ВН 15 *кв* армированный для внутренней установки (для этого ввода использован фарфоровый изолятор на 10 *кв* для наружной установки)

1 — шпилька контактная; *2* — шайба медная; *3* — контргайка; *4*, *9* — шайбы резиновые; *5* — магнезиальный цемент; *6* — колпак стальной; *7* — трубка изоляционная; *8* — изолятор фарфоровый; *10* — букса стальная; *11* — шайба из электрокартона; *12* — шайба стальная.

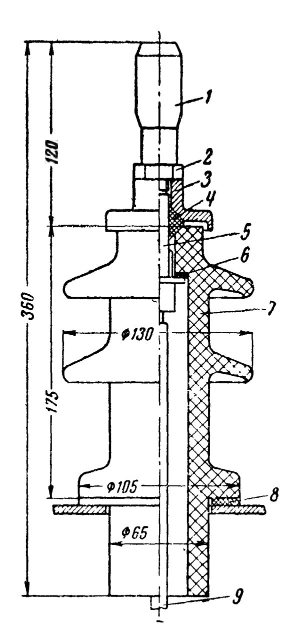


Рис. 59. Ввод 15 *кв* (с верхним ножевым контактом) для наружной установки.

1 — лопатка контактная; *2* — гайка; *3* — колпак латунный; *4* — кольцо резиновое; *5* — шпилька контактная; *6* — шайба паранитовая; *7* — изолятор фарфоровый; *8* — шайба резиновая; *9* — провод.

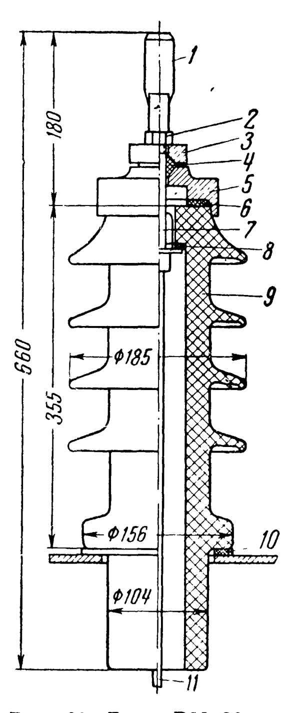


Рис. 60. Ввод ВН 20 *кв* (с верхним ножевым контактом) для наружной установки.

1 — лопатка контактная; *2* — гайка; *3* — втулка; *4* — кольцо резиновое; *5* — колпак латунный; *6*, *10* — шайбы резиновые; *7* — шпилька контактная; *8* — шайба паранитовая; *9* — изолятор фарфоровый; *11* — провод.

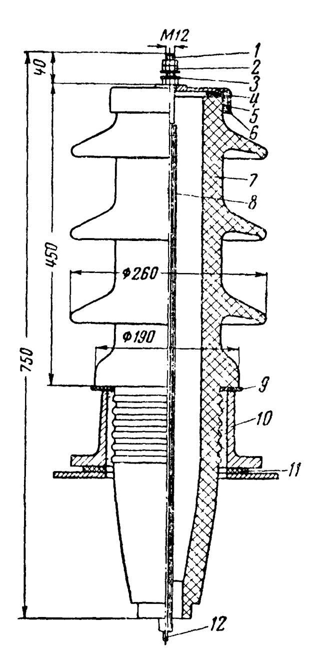


Рис. 61. Ввод ВН 35 *кв* армированный для наружной установки.

1 — шпилька контактная; *2* — контргайка; *3* — шайба медная; *4*, *9* и *11* — шайбы резиновые; *5* — магнезиальный цемент; *6* — колпак; *7* — изолятор фарфоровый; *8* — трубка изоляционная; *10* — фланец чугунный; *12* — провод.

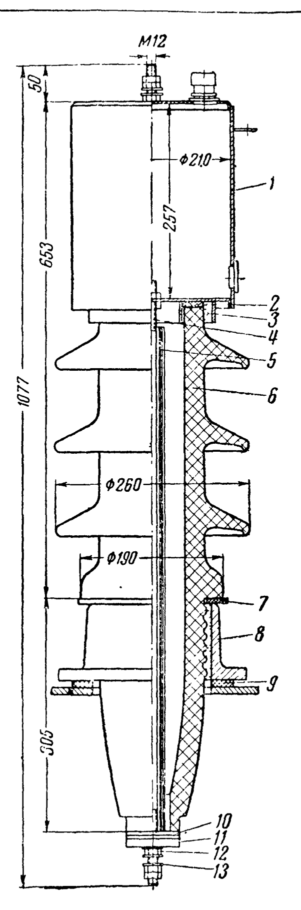


Рис. 62. Ввод ВН 35 *кв* с расширителем армированный для наружной установки.

1 — расширитель с контактной шпилькой и дыхательной пробкой; *2*, *7* и *9* — шайбы резиновые; *3* — магнезиальный цемент; *4* — шпилька контактная; *5* — трубка изоляционная; *6* — изолятор фарфоровый; *8* — фланец чугунный; *10* — шайба из электрокартона; *11* — шайба из гетинакса; *12* — контргайка; *13* — шайба медная.

В кожухе шинопровода, в том месте, где должен включаться трансформатор, имеется круглое отверстие. Трансформатор поднимают до момента закрытия отверстия крышкой бака. В этот момент контакты замыкаются и включенный таким образом трансформатор закрепляется путем привертывания крышки бака к кожуху шинопровода.

Монтаж фарфоровых вводов производится либо их армировкой магнезиальным цементом в буксах, либо механическим креплением.

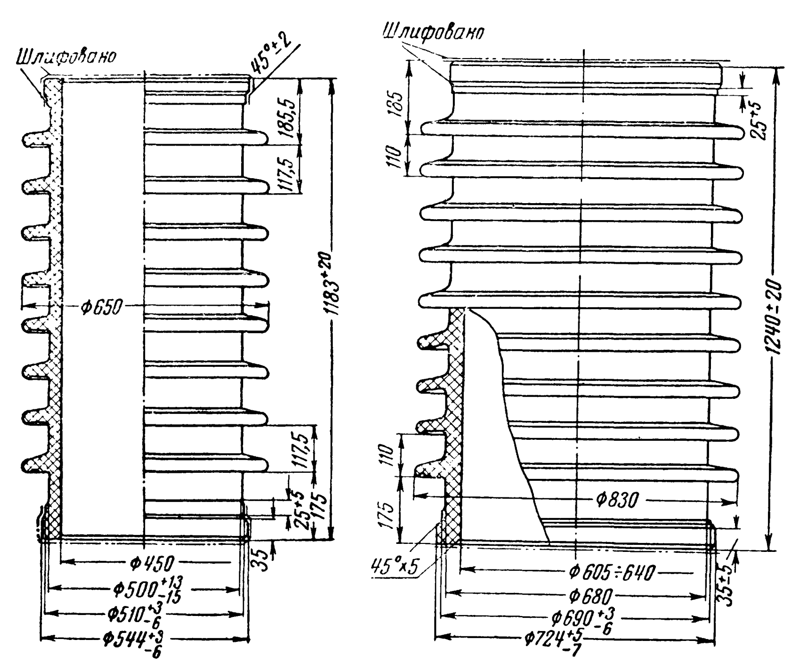


Рис. 63. Покрышка фарфоровая для трансформатора напряжения типа НКФ-110. Для НКФ-220 применяются две покрышки и для НКФ-330 — три покрышки.

Рис. 64. Покрышка фарфоровая для трансформаторов напряжения серии НКФ-400 и НКФ-500. Для НКФ-400 применяются три покрышки и для НКФ-500 — четыре покрышки.

Составные вводы закрепляются затяжкой контактной шпильки. Преимущество механического крепления заключается в возможности быстрой замены фарфора при его повреждении.

На рис. 52—64 показаны вводы НН и ВН для различных напряжений, применяемые для внутренней и наружной установок, а в приложении 2 приведены номера чертежей вводов, разработанных на Московском электрозаводе для масляных трансформаторов напряжения.

19. КАСКАДНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ

а) Общие сведения. Типы трансформаторов

Каскадные масляные однофазные трансформаторы напряжения серии НКФ предназначаются для наружной установки и изготовляются на напряжения от 110 до 500 *кв*. Они соединяются в трехфазную группу по схеме Y_0/Y_0-12 с заземленной нейтральной точкой первичной (ВН) обмотки.

Для трансформаторов напряжения на 110 *кв* и выше применение обычной конструкции является нецелесообразным, так как при относительно малой мощности этих трансформаторов их размеры чрезвычайно возросли бы из-за увеличенных вследствие высокого первичного напряжения изоляционных расстояний. При этом вес таких трансформаторов напряжения возрос бы пропорционально более чем квадрату увеличения напряжения, так как их вес растет быстрее, чем вес силовых трансформаторов при увеличении напряжения.

Исходя из этого, однофазные трансформаторы напряжения на 110 *кв* и выше с одним заземляемым концом *X* первичной обмотки (однополюсные трансформаторы) целесообразно выполнять по так называемой каскадной схеме, представляющей собой по существу несколько трансформаторов с последовательно соединенными первичными обмотками. При этом изоляция первичной обмотки от магнитопровода должна соответствовать только части общего первичного напряжения, обратно пропорциональной числу ступеней каскадной схемы. Таким образом, ступенью каскада можно назвать часть первичной обмотки, в соответствии с напряжением которой изолируется обмотка от магнитопровода. Однако при этом, разумеется, сам магнитопровод должен быть изолирован от земли соответственно его потенциалу. На рис. 65,*а* показана элементная схема двухступенчатого трансформатора напряжения. Как видно из этой схемы, магнитопровод трансформатора *II* должен быть изолирован от земли на половину фазного напряжения. Если трансформатор *II* помещен в отдельном баке, как это иногда делается у испытательных каскадных трансформаторов, то весь трансформатор также должен быть изолирован от земли, например путем его установки на опорные изоляторы.

Принцип работы каскадного трансформатора по схеме, изображенной на рис. 65,*а*, заключается в следую-

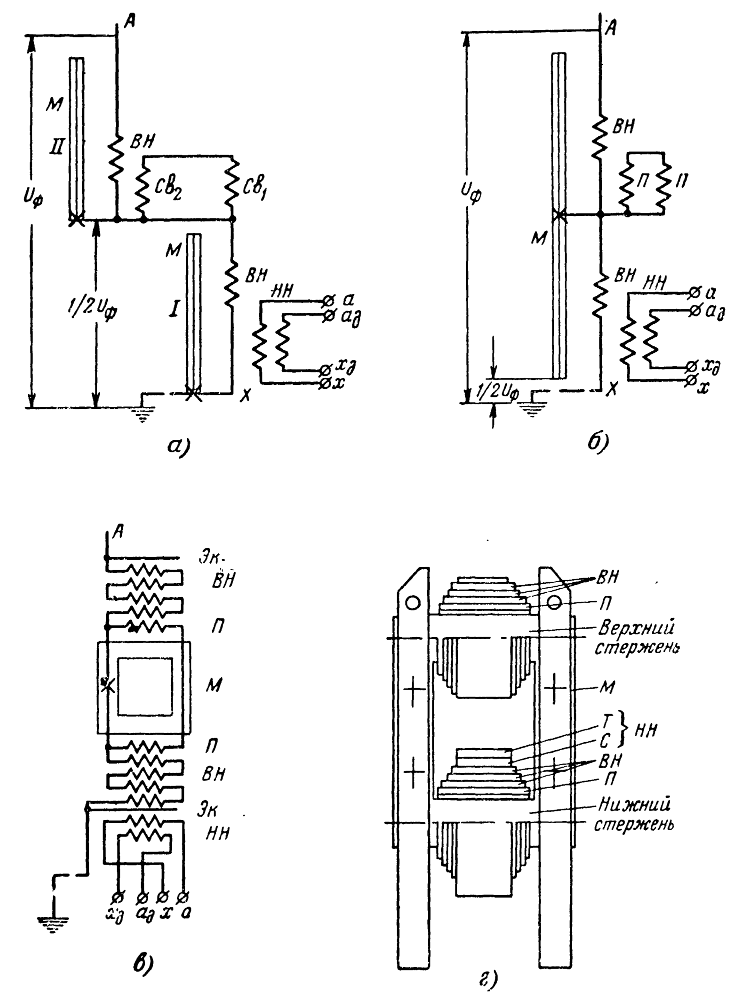


Рис. 65. Схемы двухступенчатого каскадного трансформатора НКФ на 110 *кв*.

а — элементная схема с двумя магнитопроводами; *б* — принципиальная схема с одним магнитопроводом; *в* — развернутая схема; *г* — расположение обмоток на магнитопроводе; *ВН* — первичная обмотка; *НН* — вторичные обмотки; *С* — основная (концы *a* и *x*) и *Т* — дополнительная (концы $a_д$ и $x_д$); $Св_1$ и $Св_2$ — связующие обмотки; *П* — выравнивающие обмотки; *Эк* — электростатический экран; *М* — магнитопровод.

щем: понижающий трансформатор *I* имеет первичную (ВН) обмотку, рассчитанную на половину фазного напряжения, и две вторичные (НН) обмотки — основную и дополнительную. Две вторичные обмотки предназначаются согласно ГОСТ — одна (основная) для измерительных приборов, другая (дополнительная) для релейной защиты. Последовательно с первичной обмоткой трансформатора *I* соединена первичная обмотка трансформатора *II*, также рассчитанная на половину фазного напряжения. Таким образом, полное фазное напряжение $U_ф$ делится пополам между двумя трансформаторами *I* и *II*, благодаря чему изоляция каждой из обмоток ВН рассчитывается только на половину полного напряжения.

Однако при нагрузке вторичных обмоток (одной или обеих) первичный нагрузочный ток вызовет в обмотке ВН трансформатора *II*, представляющей собой почти чистую индуктивность, большое падение напряжения, отчего напряжение между двумя элементами каскада распределится весьма неравномерно (на трансформаторе *I* оно сильно понизится). Во избежание этого на обоих трансформаторах помещают так называемые связующие обмотки $Св_1$ и $Св_2$, представляющие собой для трансформатора *II* вторичную ($Св_2$), а для трансформатора *I* — дополнительную первичную ($Св_1$) обмотки.

При отсутствии нагрузки по связующим обмоткам ток не проходит и по первичным обмоткам проходит только ток холостого хода. При включении нагрузки вследствие падения напряжения в трансформаторе *I* напряжение обмотки $Св_1$ уменьшается, благодаря чему по связующим обмоткам начинает циркулировать нагрузочный ток, размагничивающий магнитопровод трансформатора *II*. Величина этого нагрузочного тока такова, что трансформатор *II* воспринимает на себя половину нагрузки. Таким образом, благодаря связующим обмоткам нагрузка и напряжение распределяются поровну между двумя трансформаторами.

У каскадных трансформаторов напряжения количество магнитопроводов может быть уменьшено вдвое по отношению к числу ступеней каскада путем применения двухстержневых магнитопроводов и размещения на каждом из стержней по одной ступени каскада. Тогда для двухступенчатых каскадных трансформаторов напряже-

ния, обычно выполняемых для напряжения 110 *кв*, более целесообразной является схема, показанная на рис. 65,*б* и *в*. В этой схеме связующие обмотки, намотанные на двух стержнях одного магнитопровода, становятся выравнивающими и обозначаются (по заводской системе обозначений) буквой П. Их назначение в данном случае сводится к уменьшению э. д. с. рассеяния трансформатора, с учетом того, что вторичные обмотки находятся на одном нижнем стержне магнитопровода, а первичная — на обоих.

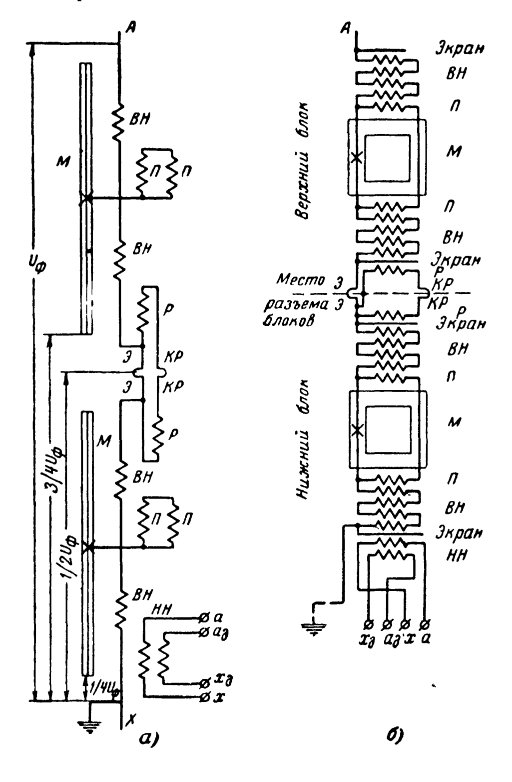
Порядок расположения обмоток показан на рис. 65,*в*. На двухстержневом магнитопроводе с горизонтальным расположением стержней (один над другим) на каждом стержне намотаны сначала выравнивающая обмотка П, а поверх нее первичная обмотка (ВН). Поверх обмотки ВН накладывается электростатический экран *Эк* из листовой латуни, описанный в § 16. На нижнем стержне, кроме того, поверх экрана намотаны вторичные обмотки — основная, концы которой обозначаются a и x, и дополнительная с концами $a_д$ и $x_д$. Таким образом они расположены вблизи заземляемого конца X обмотки ВН, имеющего наименьший потенциал относительно земли.

Начала первичных и выравнивающих обмоток обоих стержней соединены вместе и к ним присоединен магнитопровод. При этом выравнивающие обмотки и магнитопровод получают потенциал, равный половине фазного напряжения, что видно из схемы рис. 65,*б*. Расположение обмоток на обоих стержнях магнитопровода показано на рис. 65,*г*.

Каскадный трансформатор напряжения на 110 *кв* (типа НКФ-110-57), как это будет подробно изложено далее, помещается в изолирующую фарфоровую покрышку (рис. 63), наполняемую трансформаторным маслом, и представляет собой один блок. Трансформаторы напряжения на 220, 330 и 500 *кв* состоят соответственно из двух, трех и четырех двухступенчатых каскадных блоков, соединенных последовательно. На месте установки блоки ставятся один на другой, как это видно на рис. 68. В соответствии с этим трансформаторы напряжения на 220 *кв* имеют 4 ступени, расположенные на двух двухстержневых магнитопроводах, на 330 *кв* — 6 ступеней, расположенных на трех магнитопроводах, на 500 *кв* — 8 ступеней на четырех магнитопроводах.

На рис. 66,*а* приведена принципиальная схема, а на рис. 66,*б* — развернутая схема четырехступенчатого трансформатора напряжения типа НКФ-220-58.

У этих трансформаторов, так же как и у трансформаторов НКФ-110, обмотки каждых двух ступеней



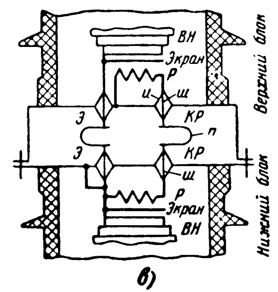
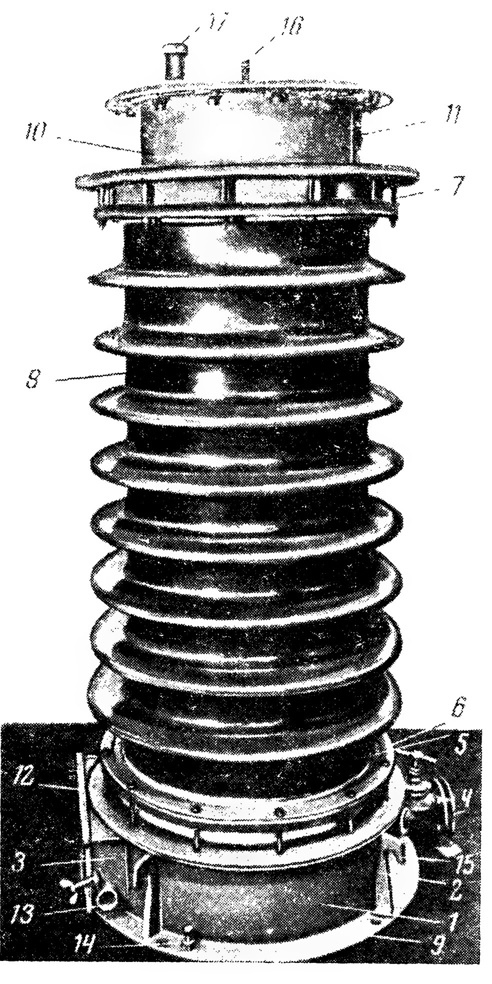


Рис. 66. Схема четырехступенчатого каскадного трансформатора напряжения НКФ на 220 *кв*.

а — принципиальная схема; *б* — развернутая схема; *в* — соединение связующих обмоток *Р* двух блоков; *ВН* — первичная обмотка; *НН* — вторичные обмотки: основная (концы *а* и *х*) и дополнительная (концы $a_д$ и $x_д$); *П* — выравнивающие обмотки; *Р* — связующие обмотки; *КР* — выводные концы связующих обмоток; *Эк* — электростатический экран; *Э*—выводные концы электростатических экранов; *и* — проходной изолятор; *ш* — шпилька изолятора; *п* — перемычка; *М* — магнитопровод.

каскада размещены на двух стержнях магнитопровода. Обе вторичные обмотки расположены на нижнем стержне нижнего магнитопровода, имеющего наименьший потенциал относительно земли. Для равномерного распределения мощности, снимаемой со вторичных обмоток по всем ступеням, служат, как было сказано ранее, выравнивающие обмотки *П* (для выравнивания мощностей в первичной обмотке одного магнитопровода) и связующие обмотки *Р* (для передачи мощности с обмотки



а)

X хд ад х а

б)

Рис. 67. Каскадный масляный трансформатор напряжения типа НКФ-110-57.

а—внешний вид; *1*—подставка; *2* — плита; *3* — коробка зажимов; *4*—спускной кран ∅ 25 *мм* для масла; *5*, *6* — кольца стальные; *7*—болты крепления покрышки к плите и расширителю; *8* — покрышка фарфоровая; *9*— рама; *10* — расширитель для масла; *11* — маслоуказатель; *12* — дверца коробки зажимов; *13* — сальник для проводов; *14* — болт заземления; *15* — крюки для подъема трансформатора; *16* — ввод *А* ВН; *17* — пробка для дыхания; *б* — доска зажимов; обозначения зажимов: *X* — конец первичной обмотки; *а* и *х* — концы основной вторичной обмотки: $a_д$ и $x_д$ — концы дополнительной вторичной обмотки; на доске зажимов расположены также два болта заземления, обозначенных стандартным знаком заземления.

одного магнитопровода на обмотки другого). На рис. 66,*в* показано соединение связующих обмоток *Р* двух блоков между собой.

Таким образом, каскадная схема дает возможность уменьшить изоляционные расстояния в каждой ступени каскада в отдельности, благодаря чему весь трансформатор в целом получается меньших размеров и веса и имеет более низкую стоимость по сравнению с трансформатором обычной конструкции.

Каскадные трансформаторы напряжения выпускаются однофазными с естественным масляным охлаждением.

Выпускаемые каскадные трансформаторы напряжения разделяются на несколько типов, которые имеют следующие обозначения:

НКФ-110-57,
НКФ-110-58,
НКФ-220-58,
НКФ-330 и
НКФ-500.

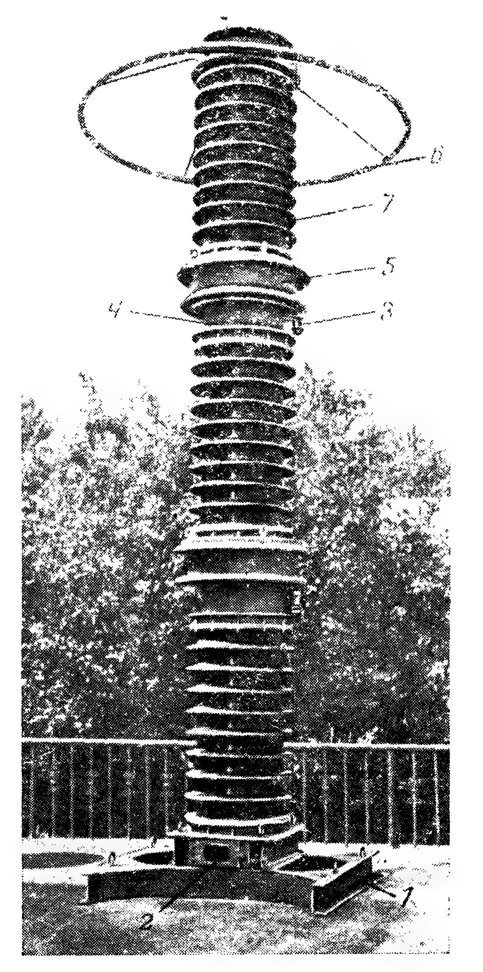


Рис. 68. Общий вид каскадного трансформатора напряжения типа НКФ-330.

1 — основание (рама); *2* — коробка зажимов НН; *3* — воздухоосушитель; *4* — расширитель для масла; *5* — подставка, закрытая щитком; *6* — емкостное кольцо; *7* — фарфоровая покрышка.

Обозначения типов каскадных трансформаторов напряжения расшифровываются следующим образом:

1. Буквенная часть: НКФ — напряжения, каскадный, в фарфоровой покрышке.

2. Цифровая часть: класс нпаряжения (первое число) и у некоторых типов год разработки типа (второе число).

На рис. 67,*а* дан внешний вид трансформатора напряжения типа НКФ-110-57, а на рис. 67,*б* — доска зажимов, находящаяся в коробке *3*. На рис. 68 показан внешний вид трансформатора напряжения типа НКФ-330.

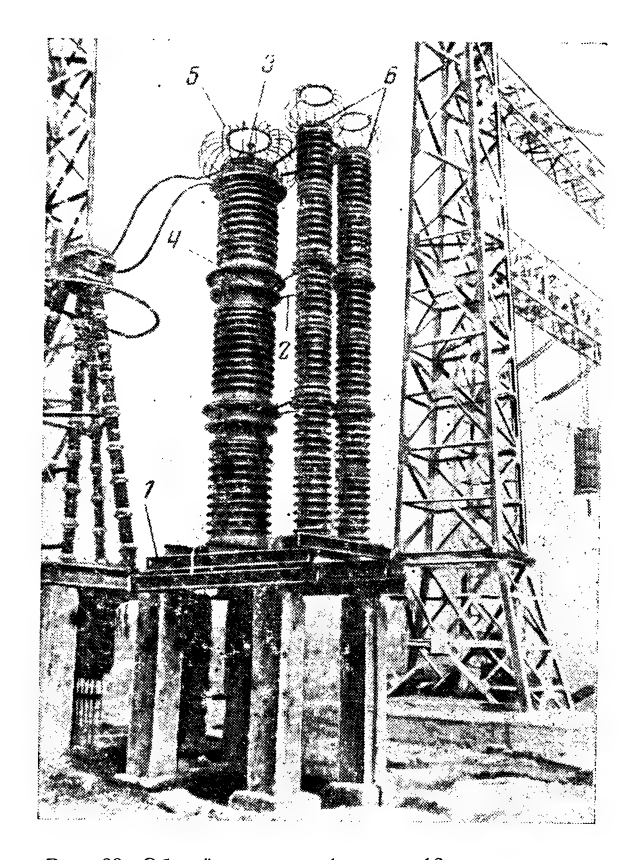


Рис. 69. Общий вид однофазного 12-ступенчатого каскадного трансформатора напряжения типа НКФ-400, установленного на распределительной подстанции.

1 — дополнительная рама; *2* — стальные тяги; *3* — воздухоосушитель; *4* — щитки; *5* — экраны; *6* — колонна с шестью конденсаторами.

До окончания разработки трансформатора напряжения типа НКФ-500 заводом выпускался трансформатор напряжения типа НКФ-400, состоящий из трех блоков с двумя двухстержневыми магнитопроводами в каждом, т. е. имеющий 12-ступенчатую каскадную схему. Общий вид установленного на подстанции каскадного трансформатора напряжения типа НКФ-400 показан на рис. 69. Для получения трансформатора напряжения на 500 *кв* к этому трансформатору добавлялся второй средний блок, и таким образом получалась 16-ступенчатая каскадная схема трансформатора, состоящего из четырех блоков. Все каскадные трансформаторы напряжения предназначены для наружной установки.

Каскадные трансформаторы напряжения типов НКФ-110-57 и НКФ-220-58 изготовляются согласно требованиям ГОСТ, а каскадные трансформаторы остальных типов — по ведомственным техническим условиям.

б) Магнитопроводы

Для каскадных трансформаторов, как было указано выше, применяются двухстержневые магнитопроводы с обмотками на каждом стержне. Сечение стержней имеет шестиступенчатую форму, ярма — двухступенчатую форму (рис. 38,*б*).

Пластины магнитопроводов покрываются лаком.

Размеры магнитопроводов указаны в табл. 7. Обозначения размеров в табл. 7 соответствуют обозначениям на рис. 38,*б*.

в) Обмотки

Конструкция обмоток каскадных трансформаторов серии НКФ сходна с конструкцией обмоток трансформатора типа ЗНОМ-35-54, схематически показанной на рис. 46. Отличие обмоток трансформаторов НКФ заключается в том, что на месте обмотки НН (катушка *П* на рис. 46) расположена выравнивающая обмотка *П*, изображенная на рис. 65,*в* и *г* и 66,*б*. Поверх обмотки ВН нижнего стержня нижнего блока помещены обе вторичные обмотки *С* и *Т*, а поверх обмоток остальных стержней, кроме верхнего у трансформаторов 220 *кв* и выше, намотаны связующие обмотки *Р* (рис. 66).

Обмотки каскадных трансформаторов пропитываются глифталевым лаком. Для лучшего склеивания об-

Графа	Рисунок	Тип трансформатора	Линейные								
			D	H	MO	A	B	h_1	h_2	b	b_1
1	38,*б*	НКФ-110-57	120	210	380	494	392	91	86	112	37
2	38,*б*	НКФ-220-58	120	210	380	494	392	91	86	112	37
3	38,*б*	НКФ-110-58	140	195	400	535	405	105	91	131	34
4	38,*б*	НКФ-330	140	195	400	535	405	105	91	131	34
5	38,*б*	НКФ-400	120	400	327	441	582	91	86	112	37
6	38,*б*	НКФ-500	120	400	430	544	582	91	86	112	37

мотки пропитка производится трижды, после намотки каждой из обмоток — П, ВН и Р (подробнее см. гл. 5).

Обмоточные данные каскадных трансформаторов приведены в табл. 8.

г) Узлы и детали конструкции

Стержни магнитопровода прессуются деревянными клиньями, расклинивающими одновременно и обмотку.

Ярма магнитопровода стягиваются толстыми планками из древесно-слоистого пластика, показанными на рис. 91, при помощи стяжных шпилек, пропущенных через отверстия в ярмах. Шпильки изолируются от магнитопровода бумажно-бакелитовыми трубками. Планки одновременно являются стойками для установки активной части.

Активная часть трансформатора напряжения НКФ-110-57 (рис. 67,*а*) установлена на плите *2* подставки *1*. Подставка сварена из листовой стали. К ней, кроме плиты *2*, приварены снизу коробка зажимов *3*, патрубок со спускным краном *4* для масла и рама (основание) *9*. В основании имеются отверстия для крепления всего трансформатора.

Активная часть закрывается фарфоровой цилиндрической покрышкой *8*, имеющей снаружи ребра. Покрышка заполняется трансформаторным маслом.

Сверху покрышка закрыта сваренным из листовой стали маслорасширителем *10*, на котором имеются указатель уровня масла *11*, контактная шпилька *16*, ввод

Таблица 7

кадных трансформаторов напряжения

размеры, *мм*										Активное сечение, *см*²		Вес стали, *кг*
b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	стержня	ярма	
21	8	8,5	—	79	114	91	73	39	—	91,8	93,3	95
21	8	8,5	—	79	114	91	73	39	—	91,8	93,3	190
15,5	13	11,5	8,5	114	135	122	105	81	48	128	126	134,3
15,5	13	11,5	8,5	114	135	122	105	81	48	128	126	403
21	8	8,5	—	79	114	91	73	39	—	91,8	93,3	688
21	8	8,5	—	79	114	91	73	39	—	91,8	93,3	519

А и пробка для дыхания *17*. Подъем блока производится за крюки *15*.

Крепление покрышки к плите *2* и маслорасширителю *10* осуществляется при помощи стальных колец *5* и *6*, привертываемых к плите *2* и расширителю *10* болтами *7*. Более детально крепление покрышки к плите показано на рис. 70. Кольца *5* и *6* при помощи утолщений *3* на покрышке прижимают ее нижний торец к плите *2*. Уплотнением служит резиновое кольцо *1*, вкладываемое между торцом покрышки и плитой.

Трансформаторы напряжения на 220 и 330 *кв* состоят соответственно из двух или трех блоков, каждый из которых представляет собой трансформатор напряжения НКФ-110 с добавлением согласно схеме рис. 66,*в* в местах соединения блоков между собой связующих обмоток *Р*. Вторичные обмотки у верхних блоков отсутствуют.

Для трансформаторов на 400 и 500 *кв* применяют покрышки большого диаметра. Такая покрышка показана на рис. 64. Установленный трансформатор типа НКФ-400 показан на рис. 69.

Трансформаторы НКФ-330, НКФ-400 и НКФ-500 устанавливаются на дополнительную раму, сваренную из стального проката и имеющую для большей устойчивости значительно бо́льшую базу сравнительно с подставкой бака. Дополнительная рама *1* видна на рис. 69. На дополнительной раме рядом с основной колонной блоков трансформатора НКФ-400 устанавливаются две

Таблица 8

Обмоточные данные однофазных каскадных трансформаторов напряжения

Тип трансформатора	Обмотка	Тип обмотки	Напряжение, *в*	Число витков	Обмоточный провод	
					Размер, *мм*	Марка
НКФ-110-57	НН	Слоевая	$100:\sqrt{3}$	20	⌀ 3,05	ПБ
	НН	"	100	35	⌀ 3,05	ПБ
	Выравнивающая П	"		40	⌀ 3,05	ПБ
	ВН	"	$110\,000:\sqrt{3}$	2×10 908: 2×10 710+ +2×136	⌀ 0,25 ⌀ 0,74**	ПЭЛШКО ПЭЛБО
НКФ-110-58	НН	Слоевая	$100:\sqrt{3}$	24	5,1×1,81	ПББО
	НН	"	100:3	14	4,4×2,83	ПББО
	Выравнивающая П	"		24	5,1×1,81	ПББО
	ВН	"	$110\,000:\sqrt{3}$	2×13 055: 2×12 782+ +2×273+ +2×62	⌀ 0,25 ⌀ 0,74* ⌀ 0,74*	ПЭЛШКО ПЭЛБО ПЭЛБО
НКФ-220-58	НН	Слоевая	$100:\sqrt{3}$	20	⌀ 3,28	ПБ
	НН	"	100	35	⌀ 3,28	ПБ
	Выравнивающая П	"		38	⌀ 3,28	ПБ ПБ
	Связующая Р	"		42	⌀ 3,28	

Продолжение табл. 8

Тип трансформатора	Обмотка	Тип обмотки	Напряжение, *в*	Число витков	Обмоточный провод	
					Размер, *мм*	Марка
	ВН	Слоевая	$220\,000:\sqrt{3}$	4×10 890: 4×10 659+ +4×231	∅ 0,25 ∅ 0,74*	ПЭЛШКО ПЭЛБО
	ВН	„	$154\,000:\sqrt{3}$	4×7 555: 4×7 300+ +4×255	∅ 0,29 ∅ 0,74*	ПЭЛШКО ПЭЛБО
НКФ-330	НН	Слоевая	$100:\sqrt{3}$	15	4,4×2,83	ПББО
	НН	„	100	26	5,1×1,81	ПББО
	Выравнивающая П	„		25	5,1×1,81	ПББО
	Связующая Р	„		26	4,4×2,83	ПББО
	ВН	„	$330\,000:\sqrt{3}$	6×8 174: 6×7 927+ +6×247	∅ 0,25 ∅ 0,74*	ПЭЛШКО ПЭЛБО
НКФ-400	НН	Слоевая	$100:\sqrt{3}$	21	10,8×2,83	ПББО
	НН	„	100	37	6,4×2,83	ПББО
	Выравнивающая П	„		80	∅ 3,28	ПБ
	Связующая Р	„		144	∅ 3,28	ПБ

Продолжение табл. 8

Тип трансформатора	Обмотка	Тип обмотки	Напряжение, *в*	Число витков	Обмоточный провод	
					Размер, *мм*	Марка
НКФ-400	ВН	Слоевая	400 000 : $\sqrt{3}$	12×6 950:		
				6×6 685+	⌀ 0,31	ПЭЛШКО
				+6×265+	⌀ 0,74*	ПЭЛБО
				+6×6 800+	⌀ 0,31	ПЭЛШКО
				+6×150	⌀ 0,74*	ПЭЛБО
НКФ-500	НН	Слоевая	100 : $\sqrt{3}$	26	8×1,56	ПББО
	НН	„	100	45	2⌀ 2,1	ПБ
	Выравнивающая П	„		111	⌀ 2,1	ПБ
	Связующая Р	„		92	⌀ 2,1	ПБ
	ВН	„	500 000 : $\sqrt{3}$	8×16 150:		
				1×15 430+	⌀ 0,25	ПЭЛШКО
				+1×270+	⌀ 0,74**	ПЭЛБО
				+2×225+	⌀ 0,74*	ПЭЛБО
				+7×15 655+	⌀ 0,25	ПЭЛШКО
				+7×270+	⌀ 0,74**	ПЭЛБО
				+7×225	⌀ 0,74*	ПЭЛБО

* Концевые витки катушки ВН выполнены из провода ⌀ 0,74

** Начальные витки катушек.

колонны, состоящие каждая из шести конденсаторов типа ДМР-70-0,0022. Эти колонны через каждые два конденсатора соединены стальными тягами *2* с расширителями блоков.

На расширителях верхнего блока трансформаторов НКФ-330 и НКФ-500 установлены емкостные экранирующие кольца, показанные на рис. 68.

Применение конденсаторных колонн у трансформатора НКФ-400 и емкостных колец у трансформаторов НКФ-330 и НКФ-500 имеет целью усилить импульсную прочность этих трансформаторов путем создания более равномерного распределения напряжений по блокам трансформатора.

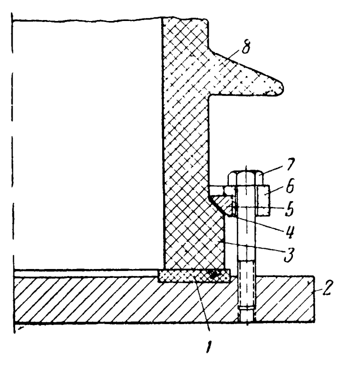


Рис. 70. Механическое крепление фарфоровой покрышки НКФ к плите.

1 — резиновое кольцо для уплотнения; *2* — плита; *3* — утолщение фарфоровой покрышки; *4* — резиновая подкладка; *5* — внутреннее разрезное стальное кольцо; *6* — наружное стальное кольцо; *7* — болт крепления покрышки к плите *2*; *8* — фарфоровая покрышка.

У трансформаторов напряжения на 110 *кв* и выше, имеющих на первичной стороне каскадную схему обмоток, напряжение между последовательно соединенными ступенями каскада при импульсном воздействии распределяется неравномерно. При этом большая часть напряжения приходится на верхние ступени каскада. При напряжении до 220 *кв* повышение напряжения на верхней ступени каскада не превышает допустимой величины и поэтому не требуется специальных мер для усиления изоляции.

У трансформаторов напряжения на 330 и 500 *кв* получающуюся большую неравномерность распределения напряжения сглаживают установкой на верхнем блоке емкостного кольца. Кроме того, обмотки верхних ступеней каскадных трансформаторов имеют усиленную изоляцию. Верхние катушки имеют удлиненную и затем отбортованную междуслойную изоляцию, которая закрывает торцовую часть катушек, как это показано на рис. 94.

У трансформаторов напряжения на 400 *кв*, выпу-

скавшихся до 1962 г., равномерное распределение по блокам создавалось принудительно путем установки емкостного делителя, состоящего из двух колонн конденсаторов. Однако такие колонны сильно повышали стоимость трансформатора напряжения и делали установку громоздкой.

При проектировании трансформатора напряжения на 500 *кв* от емкостного делителя отказались, применив емкостное кольцо такое же, как для трансформатора НКФ-330 (рис. 68).

На расширителе каждого блока трансформаторов на 220 *кв* и выше установлен воздухоосушитель (влагопоглотитель) *3* (рис. 68). Воздухоосушитель, показанный на рис. 71, представляет собой сосуд, содержащий особый состав — силикагель, обладающий способностью поглощать влагу из воздуха. Воздухоосушители в зависимости от их конструкции устанавливаются на стенке расширителя или на его крышке вместо «дыхательных» пробок, как это показано на рис. 69. При понижении уровня масла в расширителе входящий в него через воздухоосушитель наружный воздух осушается силикагелем. Входящий в воздухоосушитель через его нижнее отверстие воздух проходит через слои масла (масляный затвор), предохраняющие силикагель от постоянного увлажнения. Этот состав должен систематически заменяться по мере его насыщения влагой; насыщение определяется по изменению его цвета с голубого на розовый, что видно через стеклянный цилиндр.

Линейный зажим *А* обмотки ВН каскадных трансформаторов расположен на верхнем расширителе. Заземляемый зажим *Х* обмотки ВН, зажимы *a*, *x*, $a_д$ и $x_д$ обеих вторичных обмоток (НН) и два болта для заземления обмоток размещены на гетинаксовой доске зажимов (рис. 67,*б*), находящейся в коробке зажимов *3* нижнего блока (рис. 67,*а*). Коробка зажимов закрывается дверцей *12*, на которой прикреплен щиток с основными техническими данными трансформатора. Провода вторичных цепей пропускаются в коробку через сальник *13*, находящейся на стенке коробки.

Соединение блоков между собой показано на рис. 66,*в*. Оно производится перемычками *п*, соединяющими шпильки *ш* проходных изоляторов на расширителе нижнего блока и на дне верхнего блока.

К этим же шпилькам подведены выводные концы *Э* — от электростатических экранов и *КР* — от связующих обмоток *Р*.

Как видно на рис. 66,*в*, начало связующей обмотки *Р* верхнего блока присоединено непосредственно к пли-

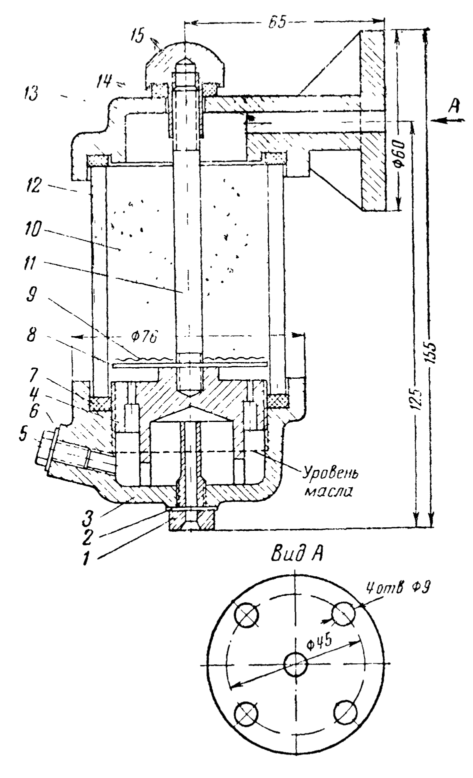


Рис. 71. Влагопоглощающий фильтр (воздухоосушитель).

1 — болт с отверстием для дыхания; *2*, *6* — шайбы паранитовые; *3* — основание чугунное; *4* — втулка стальная; *5* - болт стальной; *7*, *14* — шайбы резиновые; *8* — диск стальной; *9* — сетка латунная; *10* — силикагель; *11* — шпилька стальная; *12* — цилиндр стеклянный; *13* — колено чугунное с фланцем; *15* — гайка глухая стальная.

те основания блока (а не к шпильке изолятора). Это сделано для того, чтобы при текущем осмотре трансформатора в эксплуатации можно было проверять сопротивление изоляции обмоток, измеряя его между шпильками *Э* и *КР* (при снятых перемычках).

Подставки верхних блоков, сваренные в виде круглых каркасов из угловой стали, снаружи закрываются щитками 4 из листовой стали (рис. 69). Эти щитки, обернутые вокруг подставок, препятствуют попаданию внутрь последних капель дождя, снега, пыли и т. п.

На расширителе верхнего блока трансформатора НКФ-400, а также и на верхних конденсаторах установлены экраны 5, сваренные из стальных прутьев, окрашенные электропроводящей (с примесью сажи) краской. Эти экраны показаны на рис. 69. Они уменьшают коронирование верхней части трансформатора.

Болт заземления, находящийся на нижнем блоке вблизи коробки зажимов, обозначенный стандартным знаком заземления, виден на рис. 67,*а*.

Наружные металлические части трансформатора окрашиваются серой краской.

20. ЕМКОСТНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ (ТРАНСФОРМАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ С ЕМКОСТНЫМ ДЕЛИТЕЛЕМ)

Понижение напряжения сети для измерений приборами и для питания релейной защиты может осуществляться не только посредством обычных трансформаторов напряжения, описанных выше, но и при помощи **емкостного трансформатора напряжения**, состоящего из последовательно соединенных конденсаторов C_1 и C_2 и понижающего трансформатора *Т*, показанных на рис. 72.

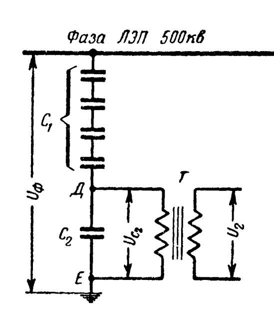


Рис. 72. Элементарная схема емкостного трансформатора напряжения.

На современных распределительных подстанциях устанавливаются колонны конденсаторов связи, служащие для осуществления высокочастотной связи между подстанциями и переключательными пунктами, а также для цепей автоматики и сигнализации. Если к этой колонне конденсаторов связи, имеющей общую емкость C_1, добавить снизу конденсатор некоторой емкости C_2, то мы получим **емкостный делитель**, который может быть использован для электрических измерений и защиты.

В точке *Д* фазное напряжение линии $U_ф$ делится на части, обратно пропорциональные значениям емкостей C_1 и C_2. Подбором соответствующих значений этих емкостей можно получить на нижнем конденсаторе C_2 требуемое напряжение U_{C2}, составляющее некоторую долю общего напряжения $U_ф$.

Если к конденсатору C_2, называемому **конденсатором отбора мощности**, подключить понижающий трансформатор *Т*, то последний может нести те же функции, что и обычный трансформатор напряжения, включенный непосредственно в линию. При этом стоимость включенного через емкостный делитель напряжения понижающего трансформатора будет значительно ниже, чем трансформатора напряжения, подключенного к сети, так как понижающий трансформатор будет иметь значительно более низкий класс напряжения.

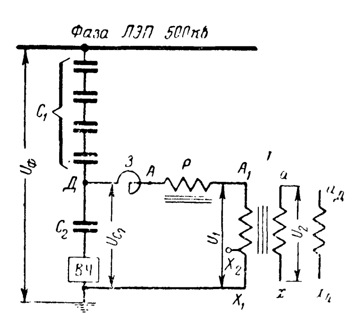


Рис. 73. Принципиальная схема емкостного трансформатора напряжения.

C_1 — конденсаторы связи; C_2 — то же отбора мощности; *З* — заградитель для токов высокой частоты; *Р* — реактор; *Т* — трансформатор; *ВЧ* — аппаратура высокочастотной связи.

Однако в таком виде емкостный трансформатор напряжения еще будет обладать тем недостатком, что по мере увеличения нагрузки вторичной обмотки ввиду наличия в цепи большой реактивности вторичное напряжение U_2 будет сильно падать. Во избежание этого последовательно в первичную цепь понижающего трансформатора включают дополнительный реактор (индуктивную катушку) *Р*, который компенсирует емкостное падение напряжения. Совокупность понижающего трансформатора и реактора составляет **трансформаторное устройство**. Кроме того, между емкостным делителем и трансформаторным устройством включается **высокочастотный заградитель** *З* для того, чтобы трансформаторное устройство не вносило большого затухания токов высокой частоты во время работы аппаратуры ВЧ связи. На рис. 73 дана принципиальная схема емкостного трансформатора напряжения.

Величина индуктивного сопротивления X реактора подбирается по формуле

$$X = \frac{1}{\omega (C_1 + C_2)} - X_т ,$$

где C_1 — общая емкость последовательно соединенных конденсаторов связи;

C_2 — емкость конденсатора отбора мощности;

$X_т$ — индуктивное сопротивление понижающего трансформатора, определяемое из опыта короткого замыкания.

В настоящее время на Московском электрозаводе разработаны два типа и выпущено несколько партий емкостных трансформаторов напряжения — типа НДЕ-400 для ЛЭП 400 *кв* и типа НДЕ-500 для ЛЭП 500 *кв*.

Емкостные делители первых партий этих трансформаторов состояли из трех для НДЕ-400 и четырех для НДЕ-500 стандартных конденсаторов связи типа СМР-133/$\sqrt{3}$-0,0186 и одного конденсатора отбора мощности типа ОМР-15-0,107 *. Начиная с 1963 г., для трансформаторов типа НДЕ-500 емкостные делители имеют три конденсатора связи типа СМР-166/$\sqrt{3}$-0,014 и один конденсатор отбора мощности типа ОМР-15-0,107. Конденсаторная колонна, состоящая из этих конденсаторов и показанная на рис. 74, служит одновременно и для высокочастотной связи между подстанциями и переключательными пунктами. Последнее обстоятельство значительно удешевляет всю установку по сравнению с трансформаторами напряжения типа НКФ.

Питаемое от емкостного делителя (конденсатора отбора мощности C_2) трансформаторное устройство состоит из однофазного трехобмоточного масляного трансформатора и реактора, встроенных в общий бак.

Емкостные трансформаторы напряжения, так же как и трансформаторы напряжения типа НКФ, предназначены для соединения в трехфазную группу по схеме Y_0/Y_0-12. Дополнительные вторичные обмотки $a_д$—$x_д$

* Конденсаторы изготовляются заводом «Конденсатор».

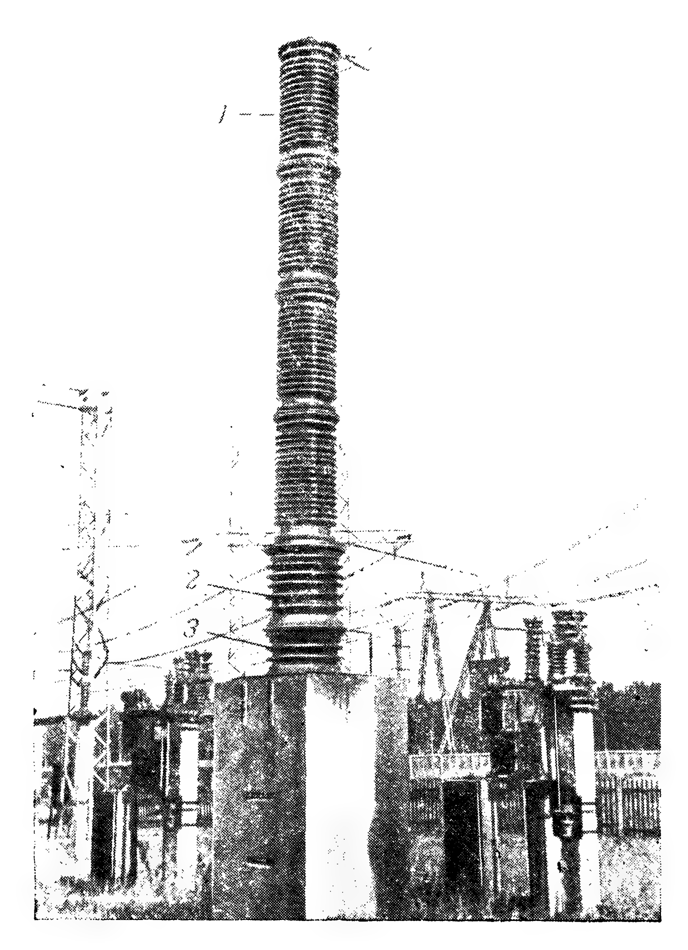


Рис. 74. Емкостный делитель трансформатора напряжения типа НДЕ-500, установленный на распределительной подстанции.

1 — конденсаторы связи типа СМР-133/$\sqrt{3}$-0,0186; 2 — то же отбора мощности типа ОМР-15-0,107; 3 — изолирующая подставка.

(рис. 73) соединяются по схеме разомкнутого треугольника и служат для питания релейной защиты от заземления.

Первичное напряжение U_1 понижающего трансформатора выбирают, исходя из мощности, требуемой для

соответствующего класса точности. Чем больше мощность, тем выше должно быть первичное напряжение. Однако для уменьшения размеров трансформатора его первичное напряжение желательно иметь возможно меньшим. Значение первичного напряжения уточняется при подборе конденсатора отбора мощности, исходя из коэффициента деления K_C, равного

$$K_C = \frac{C_1 + C_2}{C_1}.$$

Для емкостного трансформатора типа НДЕ-500, соединенного по схеме рис. 73, имеем коэффициент

$$K_C = \frac{C_1 + C_2}{C_1} = \frac{0{,}0186 : 4 + 0{,}107}{0{,}0186 : 4} = \frac{0{,}11165}{0{,}00465} = 24;$$

$$U_1 = \frac{U_ф}{K_C} = \frac{500}{\sqrt{3} \cdot 24} \approx 12 \text{ кв}.$$

Учитывая возможное повышение напряжения от атмосферных перенапряжений и нестационарных режимов, мы можем считать, что изоляция первичной обмотки понижающего трансформатора должна соответствовать классу напряжения 15 *кв*, при котором трансформаторное устройство будет иметь достаточно малые размеры.

Значения вторичных напряжений взяты в соответствии со стандартом те же, что и для трансформаторов типа НКФ, т. е. $100 : \sqrt{3}$ *в* для основной и 100 *в* для дополнительной вторичных обмоток.

Номинальные мощности емкостных трансформаторов напряжения, по согласованию с эксплуатирующими организациями, приняты 60% от соответствующих мощностей каскадных трансформаторов напряжения типа НКФ, т. е. для класса точности 1—300 *ва*, для класса точности 3—600 *ва* и максимальная мощность 1 200 *ва*.

Некоторое снижение номинальных мощностей оказалось необходимым для получения требуемых классов точности вследствие относительно больших допусков (±5%) на номинальные значения емкостей конденсаторов и связанных с этим трудностей настройки реакторов.

Конструкция трансформаторного устройства незна-

чительно сложнее обычного силового трансформатора 1-го габарита.

Понижающий трансформатор имеет магнитопровод броневого типа, собранный (шихтованный) из пластин холоднокатаной электротехнической стали марки Э310 толщиной 0,5 *мм*.

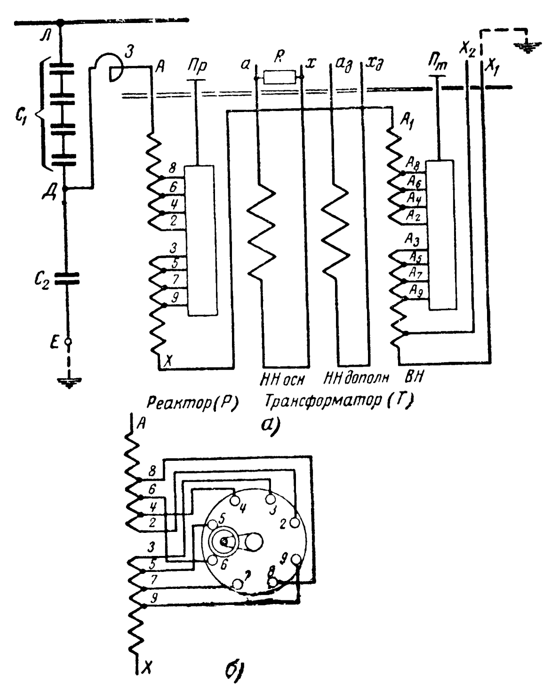


Рис. 75. Схема обмоток трансформаторного устройства емкостного трансформатора напряжения типа НДЕ-500.

а — общая схема; *б* — схема соединения барабанного переключателя реактора и понижающего трансформатора; *Пр* — переключатель реактора; *Пт* — переключатель трансформатора; *R* — балластное сопротивление, служащее для гашения феррорезонансных колебаний.

Обмотки понижающего трансформатора выполняются слоевыми. Первичная обмотка (ВН) имеет восемь ответвлений для регулирования напряжения в пределах от +5,74 до —4,92% U_1 при помощи переключателя на 7 ступеней и двух регулировочных вводов X_1 и X_2 со стороны заземляемого конца обмотки, как это видно на рис. 75,*а*. Такая схема с грубым регулированием напря-

жения на двух вводах и более тонким при помощи переключателя позволяет получить всего 14 ступеней напряжения. Регулирование напряжения в указанных пределах необходимо для компенсации разброса значений емкостей конденсаторов и отклонения вследствие этого коэффициента деления емкостного делителя от расчет-

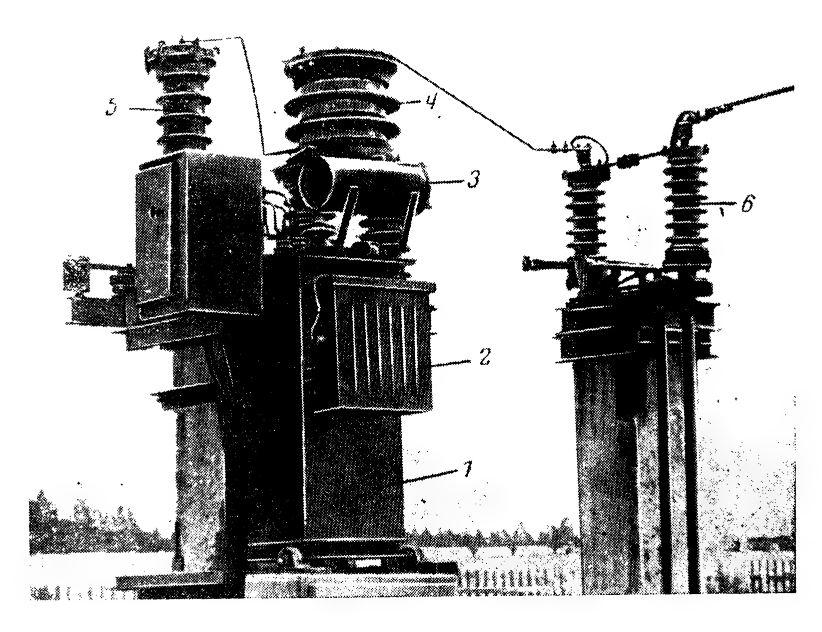


Рис. 76. Общий вид трансформаторного устройства, установленного на подстанции.

1 — бак устройства; *2* — ящик с балластным сопротивлением; *3* — расширитель для масла; *4* — высокочастотный заградитель, установленный на опорных изоляторах на крышке бака; *5* — разрядник; *6* — разъединитель.

ного значения. Вместе с тем напряжение каждой ступени понижающего трансформатора должно быть менее 1% для обеспечения на всем диапазоне регулирования класса точности 1. В трансформаторе типа НДЕ-500 напряжение ступени составляет 0,82% U_1.

Трансформатор с установленным над ним реактором помещается в общем баке, заполненном маслом.

Реактор имеет магнитопровод стержневого типа, собранный из пластин электротехнической стали марки

Э42 толщиной 0,5 *мм*. Стержни магнитопровода имеют регулируемые зазоры для первоначальной подгонки индуктивности в процессе производства. Такие зазоры обычно называют **воздушными**, но фактически они образованы при помощи пластин из электрокартона, проложенных в месте стыка двух частей магнитопровода.

Обмотка реактора также слоевая и также имеет ответвления для окончательной подгонки индуктивности в условиях испытаний и эксплуатации посредством переключателя на 7 ступеней, показанного на рис. 75,*б*.

Общий вид трансформаторного устройства типа НДЕ-500 показан на рис. 76.

На крышке бака размещены: линейный ввод ВН *А*, регулировочные вводы ВН X_1 и X_2, четыре ввода НН *а*, *х*, $a_д$ и $x_д$, два привода переключателей, расширитель для масла и кольца для подъема активной части устройства. На стенках бака приварены крюки для подъема всего устройства и укреплены заводский щиток и коробка, в которой помещено балластное активное сопротивление, состоящее из 12 сопротивлений типа ПЭ-150 по 50 *ом* каждое, соединенных параллельно. Это сопротивление *R* (рис. 75,*а*), включенное в основную вторичную обмотку, создает постоянную нагрузку около 800 *вт*, необходимую для гашения феррорезонансных колебаний во вторичной цепи [1]. Эти колебания могут возникать при внезапном отключении нагрузки, в результате чего резко повышается напряжение основной вторичной обмотки при сильно искаженной форме его кривой.

21. ТРАНСФОРМАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ С ЛИТОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Трансформаторы напряжения с масляным заполнением, как вообще все прочие масляные трансформаторы, несмотря на свои преимущества по сравнению с сухими трансформаторами, обладают тем недостатком, что требуют непрерывного надзора и ухода в эксплуатации, связанного с доливкой масла, его заменой и т. п. В ряде случаев применение масляного заполнения недопусти-

---

[1] Феррорезонанс есть частный случай резонанса и возникает в нелинейных цепях (со сталью). Характерной особенностью феррорезонанса является возникновение незатухающих колебаний с частотой, отличной от основной. В данном случае возникают колебания частоты, равной $1/3$ от основной (третья субгармоническая).

мо по условиям пожарной безопасности. Наконец, масляные трансформаторы малопригодны для передвижных установок в условиях возможной тряски при их транспортировке.

В последнее время благодаря разработке новых видов искусственных смол и компаундов стало возможно применение их для трансформаторов взамен масла.

Для трансформаторов напряжения наиболее приемлемыми являются метакриловый компаунд марки МБК-1 и эпоксидные смолы. Эпоксидные смолы находят все большее применение за рубежом.

Компаунд МБК-1 имеет достаточно хорошие электрические и механические свойства, малую усадку, хорошую внешнюю поверхность изделия и не дает трещин в пределах температур от —40 до +120° С. Простая технология заливки и небольшое время полимеризации (8—10 *ч*) при нормальной (комнатной) температуре делают компаунд МБК-1 пригодным для заливки им трансформаторов напряжения.

Электрозаводом выпущена опытная партия трансформаторов серии НОК (напряжения, однофазный, с компаундным заполнением), типа НОК-6 на 6 *кв*, обмотки которых залиты компаундом МБК-1. Внешний вид трансформатора типа НОК-6 показан на рис. 77,*а*. Эти трансформаторы по своим характеристикам совершенно идентичны масляным трансформаторам напряжения типа НОМ-6, изготовляемым согласно ГОСТ, и могут успешно заменить последние.

Трансформаторы напряжения серии НОК как трансформаторы с естественным воздушным охлаждением не требуют ухода в эксплуатации, и вместе с тем их обмотки защищены от увлажнения. По электрической прочности и по условиям нагревания они удовлетворяют требованиям ГОСТ. Таким образом, трансформаторы серии НОК не имеют недостатков сухих и масляных трансформаторов. В части расхода активных материалов, общего веса и габаритных размеров трансформаторы с литой изоляцией тоже выгодно отличаются от масляных трансформаторов. Наглядное представление об этом дают сравнительная табл. 9 и рис. 77,*б*.

Трансформаторы напряжения с литой изоляцией состоят из двух основных узлов: магнитопровода и обмотки с вводами.

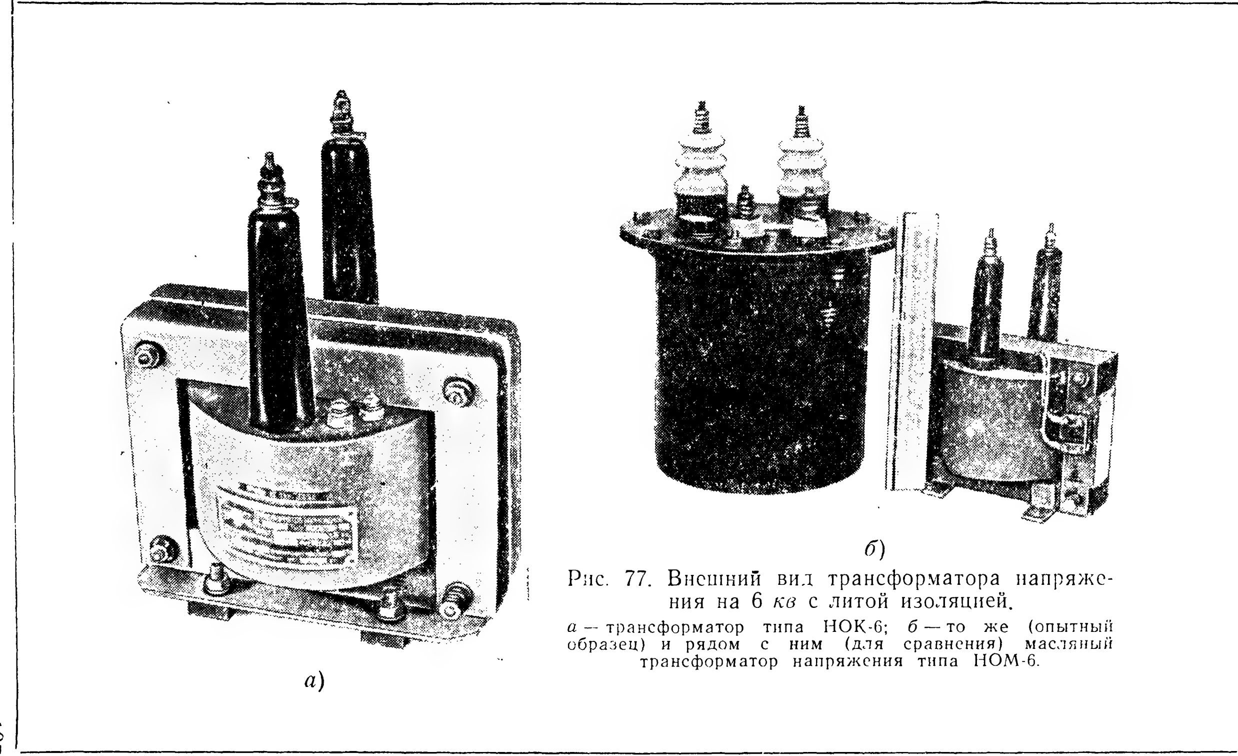


Рис. 77. Внешний вид трансформатора напряжения на 6 *кв* с литой изоляцией.

а — трансформатор типа НОК-6; *б* — то же (опытный образец) и рядом с ним (для сравнения) масляный трансформатор напряжения типа НОМ-6.

Таблица 9

Тип трансформатора	Вес, кг						Габаритные размеры, мм	
	Активные материалы		Черные металлы	Масло	Компаунд МБК-1	Полный вес, кг	в плане	высота
	сталь	медь						
НОМ-6	9,64	1,48	4,7	4,7	—	23	∅ 275	355
НОК-6	7,9	1,51	0,9	—	0,9	12	148×196	250

Магнитопровод броневого типа собирается из пластин холоднокатаной стали марки Э310 толщиной 0,5 *мм*, изолированных лаком. Сечение стержня магнитопровода имеет ступенчатую форму, а ярма — прямоугольную форму. Пластины магнитопровода стягиваются прессующими угольниками при помощи шпилек, пропущенных через отверстия магнитопровода. Стяжные шпильки изолируются кабельной бумагой.

Прессующие угольники имеют лапы с отверстиями для крепления трансформатора.

Обмотки НН и ВН выполняются слоевыми. Обмотка НН (100 *в*) намотана круглым проводом марки ПЭВ-2 на цилиндр из электроизоляционного картона. Поверх обмотки НН намотан цилиндр из крепированной бумаги (по ТУ 6-51 Министерства бумажной промышленности), служащий главной изоляцией между обмотками ВН и НН. Применение крепированной бумаги вместо обычно применяемой кабельной бумаги вызвано необходимостью обеспечить пропитку изоляции компаундом по всей ее толщине. Более плотная кабельная бумага допускает при пропитке образование воздушных промежутков, снижающих электрическую прочность изоляции.

Обмотка ВН НОК-6(на 6 000 *в*) намотана также круглым, но тонким проводом ∅0,2 *мм* марки ПЭВ-2.

Внутри (под первым слоем) и снаружи обмотки ВН положены электростатические экраны *9* (рис. 40), присоединенные один к началу, а другой к концу обмотки и служащие для повышения импульсной прочности обмотки при перенапряжениях. Снаружи обмотка изолирована несколькими слоями крепированной бумаги.

Концы обмотки ВН, изолированные трубкой также из крепированной бумаги, выведены через монолитные вводы, которые изготовлены из компаунда МБК-1.

Обмотка целиком пропитана компаундом, а затем вместе с вводами ВН залита компаундом с наполнителем (пылевидный кварц). Концы обмотки НН подведены к зажимам в фарфоровых втулках, укрепленных при заливке в компаунде на торцовой части катушки (вблизи ввода *X* ВН).

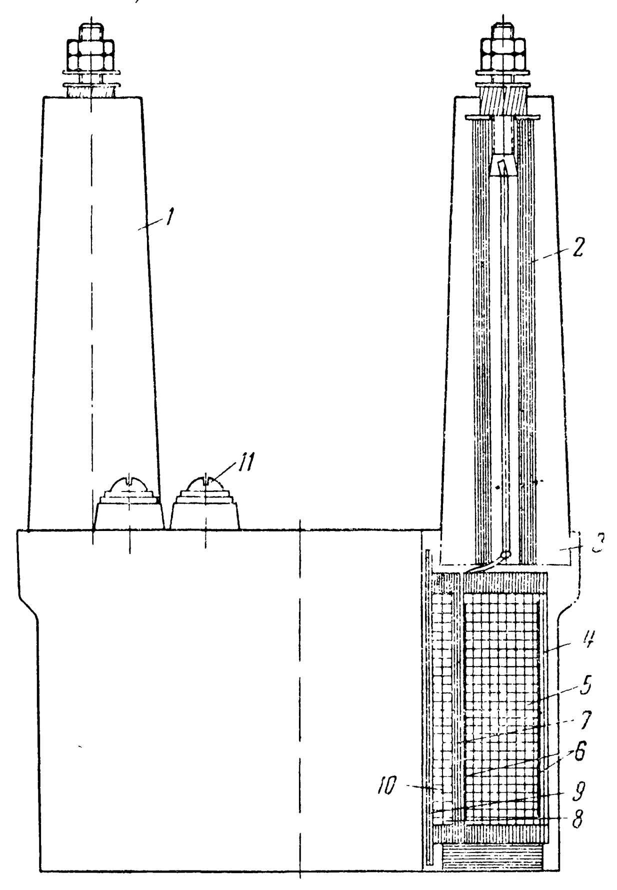


Рис. 78. Устройство компаундированной обмотки трансформатора напряжения типа НОК-6 с вводами ВН и НН.

1 — ввод ВН из компаунда; *2* — трубка из крепированной бумаги; *3* — компаундное заполнение (компаунд МБК-1 с пылевидным кварцем); *4*, *7* — бумажные цилиндры; *5* — обмотка ВН; *6* — электростатический экран; *8* — обмотка НН; *9* — цилиндр из электрокартона; *10* — междуслойная изоляция из кабельной бумаги; *11* — вводы обмотки НН.

Конструкция готовой обмотки с вводами трансформатора напряжения типа НОК-6 приведена на рис. 78.

Наружная поверхность обмотки ВН (исключая поверхность вводов) покрыта слоем из полупроводящего состава, заземляемого путем соединения с магнитопроводом металлической полоской. Это защищает обмотку от коронирования при испытании трансформатора приложенным напряжением.

Обмотка (комплект, залитый компаундом) обычным способом надета на стержень магнитопровода, укреплена на нем деревянными клиньями, одновременно прессующими пластины стержня.

После сборки остов трансформатора окрашивается в серый цвет.

22. ТРАНСФОРМАТОР НАПРЯЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

а) Общие положения

Известно, что для передачи электрической энергии на дальнее расстояние постоянный ток имеет ряд преимуществ перед переменным током. В ближайшее время вступит в эксплуатацию линия электропередачи на постоянном токе Волжская ГЭС имени XXII съезда КПСС — Донбасс. Напряжение между каждым из проводов и землей в этой линии принято 400 *кв*, а между проводами — 800 *кв*.

Для электрических измерений в этой линии, для питания цепей защиты от случайного заземления, регулирования и осциллографирования требуются трансформаторы напряжения с допустимой погрешностью напряжения ±1% при мощности до 30 *вт*.

В связи с невозможностью применения трансформаторов напряжения обычного типа для линии постоянного тока, очевидно, должны быть разработаны и применены устройства, аналогичные трансформатору, но основанные на другом принципе действия.

К настоящему времени одно из таких устройств использовалось на опытной линии постоянного тока Кашира — Москва, обеспечивая трансформацию только средних значений напряжения. Трансформация пиковых значений, могущих возникнуть в эксплуатации, этой схемой не обеспечивалась.

Научно-исследовательская работа по изучению различных схем «трансформаторов постоянного напряжения» проводилась в течение нескольких лет в Научно-исследовательском институте постоянного тока (НИИПТ). В результате проведенной работы по исследованию схем с последовательным соединением вторичных обмоток была предложена новая схема. Окончательная отработка основных параметров этой схемы производилась на ряде опытных образцов, изготовленных как НИИПТ, так и позднее Электрозаводом.

б) Принцип действия трансформатора постоянного напряжения

Принципиальная, наиболее простая схема трансформатора постоянного напряжения изображена на рис. 79.

Трансформатор постоянного напряжения состоит из двух основных частей — магнитного усилителя *МУ* и добавочного сопротивле-

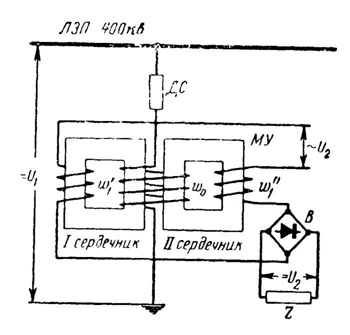


Рис. 79. Принципиальная схема трансформатора постоянного напряжения.

ДС—добавочное сопротивление; *МУ*—магнитный усилитель; *В*—выпрямитель; *Z* — нагрузка

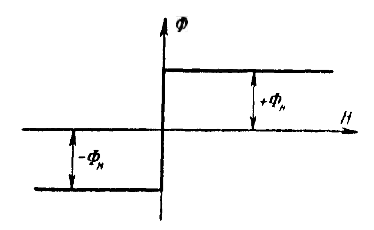


Рис. 80. Кривая намагничивания идеального сердечника МУ.

$+\Phi_н$ и $-\Phi_н$—значения ординат потока насыщения.

ния *ДС* и, кроме того, вспомогательной части, включающей в себя источник переменного тока (понижающий трансформатор) и выпрямитель.

Магнитный усилитель *МУ* состоит из двух сердечников (магнитопроводов) с одинаковыми, последовательно соединенными обмотками переменного тока w'_1 и w''_1 с одинаковым числом витков и одной общей обмоткой постоянного тока w_0. Обмотки w'_1 и w''_1 питаются от постороннего источника переменного напряжения U_2. Прибор (нагрузка) *Z* включается через выпрямитель *В*.

Обмотка w_0 через добавочное сопротивление *ДС* включена между линией электропередачи и землей. Эта цепь для проектируемого трансформатора рассчитана на номинальный ток $I_1 = 10$ *ма*, в связи с чем значение R сопротивления *ДС* должно быть равным:

$$R = \frac{U_1}{I_1} = \frac{400\,000}{0{,}01} = 40 \text{ Мом},$$

где U_1 — измеряемое напряжение ЛЭП между проводом и землей (номинальное значение).

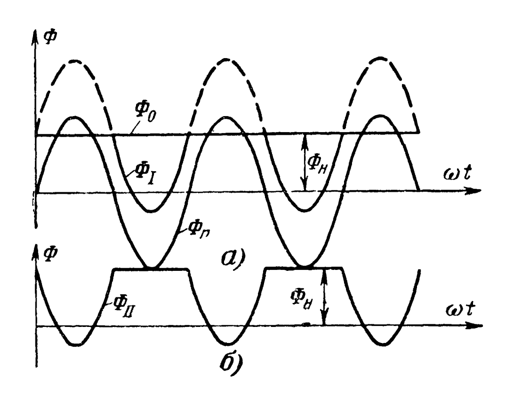


Рис. 81. Кривые магнитных потоков в сердечниках МУ.

а — потоки сердечника *I*; *б* — поток сердечника *II*.

Сопротивлением обмотки w_0, составляющим около 40 000 *ом* (т. е. около 0,1%), пренебрегают.

Для сердечников МУ необходимо применение стали, имеющей магнитную характеристику, близкую к идеально-прямоугольной, изображенной на рис. 80. Такими характеристиками обладают железоникелевые сплавы типа пермаллоя, например сплав марки 79НМ и др.

В таком сердечнике при намагничивающей силе, равной нулю, магнитный поток теоретически может иметь любое значение от $+\Phi_н$ до $-\Phi_н$, а при любом значении намагничивающей силы, не равной нулю, поток будет равен потоку насыщения $\Phi_н$.

В обмотке w_0, когда в ней отсутствует постоянный ток, э. д. с. от переменного тока, проходящего во вторичной цепи, не возникает. Это достигается соответствующим соединением между собой обмоток w'_1 и w''_1, при котором потоки обоих сердечников, пронизывающих обмотку w_0, направлены противоположно и взаимно уничтожаются.

При прохождении тока I_1 по обмотке w_0 (при включении *ДС* в линию) в обоих сердечниках от намагничивающей силы $I_1 w_0$ возникает постоянный магнитный поток, равный потоку насыщения $\Phi_н$

Переменное, практически синусоидальное напряжение U_2 уравновешивается э. д. с., наводимой в одной из обмоток w'_1 или w''_1. Активным падением напряжения $I_2 r_2$ в этих обмотках ввиду его малой величины можно пренебречь.

Вторичный ток I_2 будет в данных условиях пропорционален первичному току I_1, а следовательно, и первичному напряжению U_1. Это может быть показано следующим образом.

Рассмотрим кривые потоков в сердечниках I и II. Магнитный поток в каждом сердечнике будет складываться из двух потоков — постоянного Φ_0 от н. с. $I_1 w_0$ и переменного $\Phi_п$ от н. с. $I_2 w'_1$ (или $I_2 w''_1$). Однако максимальное значение суммарного потока Φ_I (или Φ_{II}) не может превышать максимального значения $\Phi_н$ в соответствии с кривой рис. 80. Поэтому кривая потока Φ_I (или Φ_{II}) будет иметь срезанные вершины, как это показано на рис. 81,*а* и *б*. Кривые потоков Φ_I и Φ_{II} сдвинуты между собой на 180° (т. е. на половину периода).

Мгновенные значения намагничивающих сил в каждом сердечнике складываются между собой. В сердечнике I будут складываться н. с. $i_1 w_0$ и $i_2 w'_1$, а в сердечнике II — $i_1 w_0$ и $i_2 w''_1$, причем через i_1 и i_2 обозначены мгновенные значения первичного и вторичного токов. Однако изменение потока в этих сердечниках может происходить только тогда, когда н. с. направлены встречно друг другу. Когда они направлены согласно, то благодаря особенностям магнитной характеристики стали поток будет иметь постоянную величину, равную потоку насыщения $\Phi_н$.

Предположим, что магнитный поток меняется в сердечнике I, тогда н. с. обмоток этого сердечника должны быть равны и обратно направлены, т. е. $i_1 w_0 + i_2 w'_2 = 0$. Отсюда следует, что токи в его обмотках обратно пропорциональны числам витков, т. е.

$$i_2 = -i_1 \frac{w_0}{w'_1} = -\frac{U_1}{R} \cdot \frac{w_0}{w'_1}.$$

Полученную выше формулу для мгновенного значения вторичного тока i_2 можно применить и для средних и действующих значений вторичного тока, т. е.

$$I_2 = \frac{U_1}{R} \cdot \frac{w_0}{w'_1} \equiv U_1.$$

Так как вторичная цепь питается переменным током, то изменение потока будет происходить каждую половину периода поочередно — то в одном, то в другом сердечнике. Поскольку вторичный ток остается переменным, то, для того чтобы приборы и аппараты питались постоянным током, т. е. током одного направления, они должны включаться через выпрямитель, соединенный по мостовой схеме.

Описанная схема будет надежно работать в том случае, когда материал, из которого изготовлены сердечники, будет иметь форму кривой намагничивания, весьма близкую к прямоугольной. Для этой

цели, как указано выше, следует применять специальные сплавы — пермаллой, альсифер и др. Кроме того, сердечники не должны иметь воздушных зазоров в стыках пластин, так как эти зазоры будут сглаживать кривую намагничивания для сердечника в целом. Поэтому целесообразно применять замкнутые сердечники без зазоров, например спирального типа, намотанные из рулонного или полосового материала. Обмотки при этом, разумеется, должны наматываться на уже готовые сердечники. Это, конечно, усложняет технологию изготовления МУ.

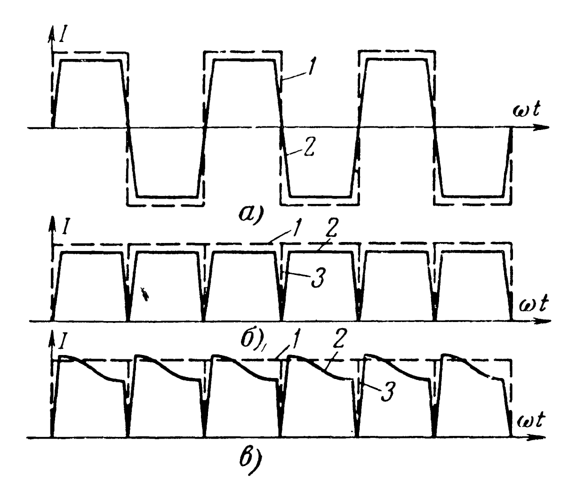


Рис. 82. Кривая вторичного тока, соответствующая обычной схеме.

а — до выпрямления тока; *б* — после выпрямления; *в* — то же с учетом влияния второй гармоники; *1* — кривая для идеального сердечника; *2* — то же для реального; *3* — «провалы» кривой вторичной тока.

Однако даже лучшие сорта стали не могут обеспечить вполне правильную форму вторичного тока, т. е. такую, при которой значение вторичного тока точно повторяло бы изменение первичного напряжения U_1 (с определенным коэффициентом трансформации) не только в рабочем режиме, но и в неустановившихся режимах. В описанной схеме в кривой вторичного тока появляются провалы (рис. 82,*а* и *б*).

Теоретически кривая вторичного тока I_2 должна иметь прямоугольную форму, показанную пунктирной кривой *1* на рис. 82,*а* и *б*. Но так как кривая намагничивания не имеет точной прямоугольной формы, то кривая тока должна иметь форму, показанную сплошной кривой *2* на рис. 82,*а* и *б*. Фактически ввиду возникающих в первичной цепи четных гармоник э. д. с. и тока кривая вторичного тока искажается еще больше и принимает форму кривой *3* (рис. 82,*в*).

Таким образом, данная схема нуждается в усовершенствовании.

в) Конструкция трансформатора постоянного напряжения (опытного образца) типа НПТ-400

Сердечники МУ изготовлены спиральными, т. е. витыми из полос пермаллоя марки 79НМ толщиной 0,2 *мм*. Готовые сердечники подвергаются специальному отжигу.

Обмотки переменного тока выполняются слоевыми, имеют по 208 витков из провода ПЭВ-2 ∅ 0,9 *мм* и наматываются ручным способом.

Обмотка постоянного тока секционная и намотана проводом ПЭВ-2 ∅ 0,09 *мм* на бакелитовых цилиндрах. Для облегчения про-

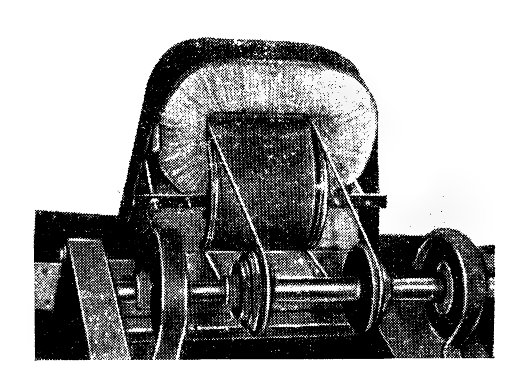


Рис. 83. Станочное приспособление конструкции инж. А. И. Фролова для вматывания обмоток в замкнутые сердечники МУ.

цесса намотки и для повышения ее качества обмотка выполнена на специальном намоточном приспособлении, разработанном инж. А. И. Фроловым (рис. 83).

Активная часть МУ (сердечники с обмотками) помещена в бак с маслом. Концы обмоток выведены: постоянного тока через фарфоровые вводы на 35 *кв*, расположенные на стенке бака, а переменного тока — через вводы на 1 *кв*, помещенные на крышке.

Наиболее громоздкую часть трансформатора постоянного напряжения составляет добавочное сопротивление типа ДС-400.

Это сопротивление размещено в четырех блоках. Каждый блок представляет собой стеклянную трубу с намотанным на ней микропроводом высокого стабильного сопротивления, установленную в отдельную фарфоровую покрышку ∅ 600 *мм* (применяемую для трансформатора НКФ-500). Сопротивление каждого блока составляет 10 *Мом*.

Все блоки установлены друг на друга в одну колонну и имеют общее заполнение трансформаторным маслом.

Особое внимание обращено на отведение потерь мощности в сопротивлении, составляющих

$$P = I_1^2 R = 0{,}01^2 \cdot 40 \cdot 10^6 = 4 \ \textit{квт}.$$

Ввиду плохой теплопроводности фарфора для лучшего охлаждения верхних слоев масла маслорасширитель на верху колонны выполнен увеличенной высоты с вваренными в его стенки трубами.

Колонна ДС-400 и МУ установлены на основании, укрепленном на фундаменте.

Шкаф с вспомогательной частью (выпрямитель и питающий трансформатор) устанавливается отдельно в помещении подстанции.

Все металлические части трансформатора окрашены в серый цвет.

Габаритные размеры ДС-400 и МУ составляют:

в плане 2 300×2 300 *мм;*

высота 6 850±80 *мм.*

Общий вес трансформатора составляет около 4 500 *кг.*

Вес масла в МУ и блоках ДС составляет 400 и 1 500 *кг.*

ГЛАВА ПЯТАЯ

ТЕХНОЛОГИЯ НАМОТКИ ОБМОТОК[1]

23. ОБОРУДОВАНИЕ, ИНСТРУМЕНТ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Основным оборудованием для намотки катушек служит обмоточный станок, показанный на рис. 84.

Обмоточный станок должен быть снабжен приводным электродвигателем, педалью с тормозной колодкой *5*, счетчиком оборотов шпинделя *1*, механизмом *2* для автоматической раскладки витков, устанавливаемым в соответствии с тем или другим размером диаметра провода, рукояткой *3* приспособления для перемены направления хода механизма для раскладывания витков и паяльной ванной *4* для пайки проводов.

Дополнительными приспособлениями являются: стойка для барабана с обмоточным проводом и с натяжным устройством, газовая горелка и набор шаблонов для наматывания катушек.

В набор инструмента входят: молоток, плоскогубцы,

---

[1] В этой главе приводятся некоторые практические сведения из заводского опыта, которые могут быть полезными при необходимости ремонта обмоток наиболее массовых типов трансформаторов напряжения НОМ-6, НОМ-35 и НКФ-110-57.

кусачки, мелкий напильник, нож, ножницы, фибровая прокладка, паяльник и др. Необходимыми вспомогательными материалами являются: припой, флюс, парафин, лента (киперная и тафтяная), бакелитовый лак и др.

Рабочее место обмотчика должно быть хорошо организовано.

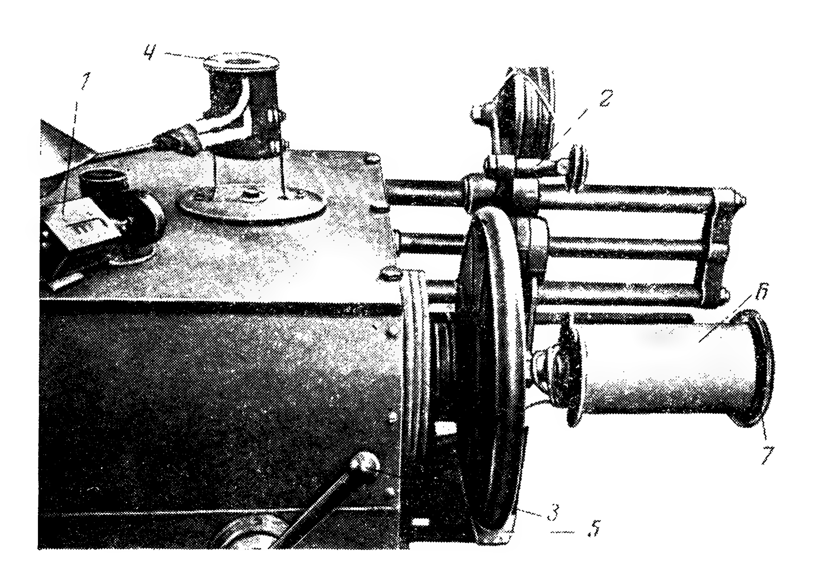


Рис. 84. Обмоточный станок.

1 — счетчик оборотов шпинделя; *2* — механизм для автоматической раскладки витков; *3* — рукоятка переключения направления хода механизма для раскладки витков; *4* — паяльная ванна; *5* — тормозная колодка; *6* — готовая обмотка НН; *7* — шаблон (щека).

Перед намоткой катушек к станку должны быть доставлены все необходимые материалы. Барабан (бухта или катушка) с обмоточным проводом должен быть освобожден от упаковки, установлен на стойки, конец провода продет через натяжное приспособление и протянут до шпинделя. На шпинделе должен быть установлен шаблон для намотки катушек. Изоляционные материалы — бумажно-бакелитовые цилиндры, каркасы, листы и полосы электрокартона, междуслойная изоляция, бортики, выравнивающие кольца, экраны, изоляционные трубки и т. п. должны располагаться поблизо-

сти от рабочего места обмотчика в виде заготовок с размерами, указанными в чертежах.

До начала наматывания обмотки рабочий-обмотчик вместе с нарядом на работу должен получить также чертежи и расчетную записку обмотки. Прежде чем приступить к работе, обмотчик должен внимательно ознакомиться с формуляром расчета и чертежом, убедиться в наличии необходимых материалов, после чего может приступить к наматыванию обмотки.

Обмотки трансформаторов напряжения, как указывалось в гл. 4, изготовляются слоевыми или катушечными, состоящими из двух многослойных катушек. Технология их намотки не является особенно сложной. Обмотки ввиду относительно малых токов наматываются обычно обмоточным проводом круглого сечения на бумажно-бакелитовом цилиндре или на цилиндре из электротехнического картона. Первичные обмотки имеют большое число (до 10 000 и более) витков тонкого провода, поэтому механизация процесса их намотки весьма целесообразна. Однако быстрая и высококачественная намотка катушек в значительной степени зависит также от квалификации рабочего.

Намотка многослойных катушек из провода ∅0,2—0,35 *мм* обычно производится в следующей последовательности. После намотки витков первого слоя станок останавливают, накладывают междуслойную изоляцию по периметру катушки, переключают рукояткой *3* (рис. 84) раскладочный механизм *2* в обратном направлении и только после этого снова плавно включают станок.

Однако такой технологический прием сдерживает рост производительности труда обмотчиков, так как при этом процесс намотки витков сопровождается последовательными остановками станка и прокладкой бумажной изоляции на уложенные витки обмотки.

По мере приобретения производственного опыта обмотчики применяют способ непрерывной намотки многослойной катушки.

Когда намотка витков в слое подходит к концу, обмотчик не останавливает станок, а только несколько уменьшает его скорость, подкладывает изоляцию под провод витка, прижимает ее рукой к катушке и переключает рукоятку *3* в обратном направлении.

Междуслойная изоляция накладывается при этом на катушку за один оборот станка, и с этого момента начинается намотка следующего слоя. Очевидно, что механизм для раскладки витков должен быть хорошо отрегулирован и не иметь люфтов.

При таком приеме процесс намотки катушки идет непрерывно без остановки станка, что увеличивает производительность труда обмотчиков. Многие обмотчицы, работающие на Электрозаводе, приобретая большой навык в этой работе, достигли высоких производственных показателей, значительно превышая установленные нормы выработки.

Частым видом дефекта обмоток, наматываемых на быстроходных станках, является обрыв провода при намотке. Число холостых оборотов шпинделя после момента обрыва учесть трудно, и это ведет к неверному числу витков наматываемой катушки и, как следствие этого, к исправлению катушки после ее испытания на контрольном пункте. Имеется несколько предложенных систем автоматических приспособлений (автостопов), останавливающих шпиндель при обрыве провода, однако все они пока имеют существенные недостатки.

Основной недостаток автостопов заключается в том, что преодолеть инерционные силы без повреждения обмотки весьма затруднительно. Мгновенное затормаживание шпинделя вызывает смещение витков в катушке, что влечет за собой обрыв в проводе внутри катушки.

Поэтому наиболее рационально во время обрыва провода не стремиться затормаживать шпиндель станка с обмоткой, а отключить счетчик оборотов от станка.

В качестве примера типовой технологии намотки катушек трансформаторов напряжения может быть взят процесс намотки катушки транформатора типа НОМ-6. Выпуск этих трансформаторов напряжения является наиболее массовым.

24. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС НАМОТКИ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ ТИПА НОМ-6

а) Намотка обмоток НН

Порядок операций. На шпиндель станка устанавливают шаблон для намотки. Шаблон, показанный на рис. 85,*а*, состоит из двух стальных щек *2* и стального

полого цилиндра *1* с продольным разрезом для облегчения снимания с него готовой катушки. На шаблон наматывается лист электрокартона толщиной 0,5 *мм* в 3 оборота, причем предварительно края листа смазывают-

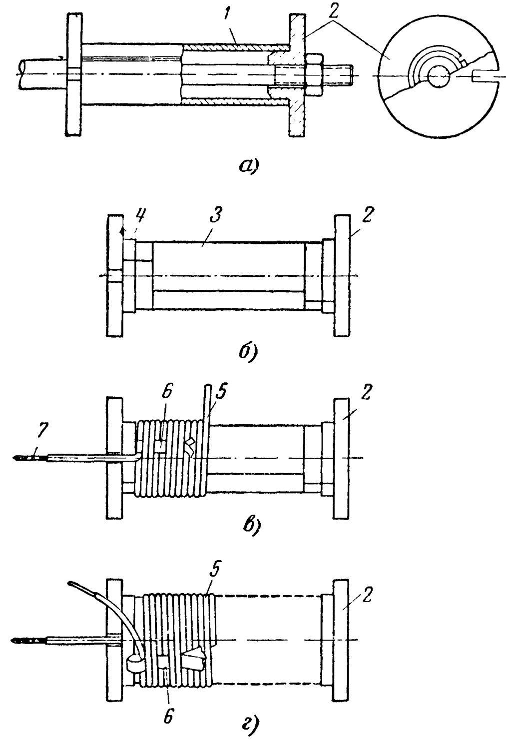


Рис. 85. Намотка слоевой обмотки НН трансформатора типа НОМ-6.

а — шаблон для намотки; *б* — то же с надетым цилиндром из электрокартона и концевыми бортиками; *в* — обмотка НН в начальной стадии намотки; *г* — окончание намотки обмотки НН, закрепление последнего витка; *1* — разрезной цилиндр шаблона; *2* — стальная щека шаблона; *3* — цилиндр, склеенный из электрокартона; *4* — бортик; *5* — обмоточный провод; *6* — петля из хлопчатобумажной ленты; *7* — начальный выводной конец обмотки.

ся густым бакелитовым лаком. Ширина листа берется по осевому размеру катушки, и таким образом получается изоляционный цилиндр *3*, на котором затем наматывается катушка, как это показано на рис. 85,*б* и *в*. Вплотную к обеим щекам *2* шаблона укладывают бор-

тики 4, концы которых снизу смазаны бакелитовым лаком. О значении бортиков, показанных на рис. 31,*а*, изложено в § 15.

К концу обмоточного провода (⌀1,12 *мм* марки ПЭЛ) припаивают гибкий провод (сечением 1,5 *мм*^{2} марки ПАМГ или ПЩ); место пайки гибкого провода изолируют электроизоляционной (линоксиновой) трубкой. Счетчик оборотов шпинделя станка устанавливают на нуль.

Начальный выводной конец 7 (рис. 85,*в*) из гибкого провода вкладывается в вырез щеки с левой стороны шаблона, и на него надевается петля 6 из хлопчатобумажной ленты; затем станок включают и начинают наматывать первый слой катушки, следя за тем, чтобы витки ложились ровно и плотно один по отношению к другому. Концы петли 6 из ленты через 6—8 витков смазывают бакелитовым лаком, затягивают, и таким образом начальный выводной конец оказывается прочно прикрепленным к виткам намотки, как это показано на рис. 85,*в*.

Намотав первый слой провода, кладут междуслойную изоляцию из кабельной бумаги, затем опять устанавливают бортики 4, меняют направление раскладки и наматывают второй слой и т. д.

За 6—8 витков до окончания намотки (согласно показанию счетчика оборотов шпинделя) для лучшего закрепления второго выводного конца катушки прокладывают две петли из хлопчатобумажной ленты аналогично тому, как это делалось для закрепления начального выводного конца. Катушку наматывают до требуемого количества витков и провод обрезают. К концу обмоточного провода опять припаивают гибкий провод, изолируют его изоляционной трубкой, продевают в петли из ленты, которые затем затягивают, прочно закрепляя провод, как это показано на рис. 85,*г*.

На катушку наматывают лист электрокартона, ширина которого равна осевому размеру катушки. Конец листа электрокартона смазывают (снизу) бакелитовым лаком, закрепляют несколькими оборотами киперной ленты или временным пружинным кольцом. На рис. 84 показана готовая катушка НН 6 на шаблоне 7 перед снятием ее с обмоточного станка.

Готовую катушку НН (вместе с цилиндром из элек-

трокартона) снимают с шаблона и предъявляют работнику ОТК, который тщательно ее проверяет, т. е. производит наружный осмотр, проверяет правильность выполнения вывода концов в соответствии с чертежом и по расчетной записке все размеры (внутренний и наружный диаметры и осевой размер) катушки, а также измеряет диаметр провода. После этого катушку направляют на контрольный пункт испытательной станции для проверки числа витков.

б) Намотка обмоток ВН

Обмотка ВН выполняется катушечная; она состоит из двух катушек и наматывается поверх обмотки НН. Общее строение обмотки ВН и расположение изоляции между обмотками НН и ВН показаны на рис. 40.

Готовую обмотку НН закрепляют в щеках на шпинделе обмоточного станка. На обмотку НН наматывают цилиндр 5 (рис. 86) толщиной 1,5 *мм* из полосы кабель-

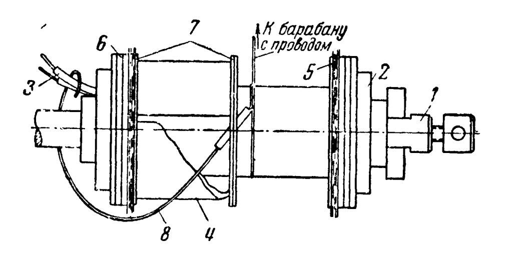


Рис. 86. Намотка катушечной обмотки ВН трансформатора типа НОМ-6.

1 — шпиндель станка; *2* — щека; *3* — выводные концы обмотки НН; *4* — временная дистанционирующая прокладка из электрокартона; *5* — отбортованный цилиндр из кабельной бумаги с надрезанными и отогнутыми краями; *6* — концевые шайбы из электрокартона; *7* — средние и крайние шайбы из электрокартона; *8* — обмоточный провод.

ной бумаги, края которой надрезаны, как показано на рис. 41,*а*. Конец полосы смазывают бакелитовым лаком.

На намотанный из кабельной бумаги цилиндр надевают четыре шайбы 7 (рис. 86) из электрокартона, из которых две будут средними; они служат для разделения двух катушек, а две другие устанавливаются по краям цилиндра, в начале надрезов бумаги. Надрезан-

ные края отгибают под углом 90°, и таким образом образуется отбортованный цилиндр, показанный на рис. 41,*б*. По концам обмотки НН вплотную к отогнутым и тщательно расправленным краям отбортованного цилиндра *5* ставят концевые шайбы *6*.

Выполнив эти подготовительные операции, приступают к наматыванию катушки ВН. Поскольку направление намотки катушек ВН должно быть л е в о е, то (как это было подробно описано в § 15) сначала наматывают вторую катушку, т. е. находящуюся справа (рис. 86). Конец обмоточного провода *8* на указанном рисунке, изолированного лакотканью, продевают с правой стороны под средние шайбы *7*, выпускают его с левой стороны на длину 400—500 *мм* и закрепляют на катушке, обмотав им начало *3* обмотки НН, находящееся также слева. На месте первой (левой) катушки устанавливают временную (технологическую) дистанционирующую прокладку *4*.

Приспособление для раскладки витков в слое должно быть установлено с шагом подачи обмоточного провода вдоль катушки, равным диаметру обмоточного провода с изоляцией.

Ставят счетчик оборотов на н у л ь и начинают намотку витков согласно чертежу, прокладывая между слоями кабельную бумагу с загнутыми краями, как показано на рис. 36.

Витки в слое укладывают между отвернутыми бортами (краями) бумаги; отвернутый борт является концевой изоляцией в слое, как это видно на рис. 36.

Переход витка в следующий слой осуществляется по кабельной бумаге, которую укладывают на поверхность намотанных витков. Переключение рычага *3* (рис. 84) обеспечивает равномерную подачу провода в следующем слое.

Следует не забывать о том, что первые 2—3 слоя укладываются тесно, поэтому витки в слое должны оправляться фибровым клином (прокладкой) и наматываться по возможности плотнее. Намотка последующих витков будет уже проходить нормально, потому что все неровности, вызванные отворотами кабельной бумаги, будут сглажены первыми двумя-тремя намотанными слоями.

После намотки катушки тонким (∅0,2 *мм*) проводом

к концу тонкого провода припаивают провод увеличенного для большей механической прочности диаметра, равного 0,74 *мм*. Концы проводов перед пайкой тщательно зачищают, производят пайку и изолируют место последней лакотканью. Экран *9*, показанный на рис. 40, устанавливают таким образом, чтобы его отвод из ленточной меди приходился согласно чертежу в том месте, где будет выведен конец катушки. Провод ∅0,74 *мм* наматывают плотно в один слой поверх экрана, предварительно положив на него междуслойную изоляцию. Только плотная намотка витков обеспечивает надежное крепление экрана.

К концу обмоточного провода припаивают отвод от экрана и гибкий провод сечением 1,5 *мм* марки ПАМГ. Место пайки тщательно зачищают и изолируют лакотканью. На гибкий провод надевают линоксиновую трубку, катушку обертывают полосой кабельной бумаги и бандажируют хлопчатобумажной лентой вполуперекрышку. Конец ленты закрепляют и подклеивают.

После этого катушку снимают со шпинделя станка вместе со щеками, перевертывают на 180° вдоль оси и снова устанавливают на шпиндель станка для намотки второй катушки обмотки ВН. Для этого снимают временную дистанционирующую прокладку *4* (рис. 86), фиксировавшую положение средней шайбы *7*, отрезают лишнюю длину выпущенного под шайбой провода, припаивают к нему провод, идущий от барабана, изолируют место пайки, устанавливают счетчик оборотов на нуль и наматывают вторую катушку аналогично первой.

Затем обмотку снимают со станка, обрезают выступающие за шайбы *6* концы надрезанных краев отбортованного цилиндра *5*, связывают обмотку вместе с концевыми шайбами *6* из электрокартона хлопчатобумажной лентой, производят контроль размеров и проверяют число витков.

Окончательная отделка обмотки состоит в обрезке концов катушек в соответствии с чертежом, зачистке их изоляции и лужении. На готовой обмотке укрепляется ярлык с номером расчетной записки и табельным номером обмотчика и клеймо ОТК, и обмотка отправляется в сборочный цех.

Обмотки НН и ВН остальных типов трансформаторов напряжения до 15 *кв* включительно выполняются

также слоевыми (НН) и катушечными (ВН) и имеют незначительные конструктивные отличия от описанной обмотки трансформатора типа НОМ-6, и технология их намотки практически повторяет описанную.

Несколько проще намотка катушек ВН сухих трансформаторов типов НОС-0,5, ОСБ-0,2 и НТС-0,5 и масляных трансформаторов серии НТМИ, слоевые обмотки ВН которых состоят всего лишь из одной катушки (на каждом стержне). Обмотка трансформатора НОС-0,5 показана в разрезе на рис. 39.

Обмотка ВН трансформатора типа НОМ-15, как показано на рис. 45, наматывается на обмотку НН не вплотную, а на промежуточных рейках, образующих масляный канал между обмотками, с целью получить более прочную главную изоляцию.

Несколько сложнее технология намотки обмоток на 35 *кв* и выше.

25. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС НАМОТКИ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ ТИПА НОМ-35

а) Намотка обмоток НН

Обмотка НН — однослойная. Порядок наматывания такой обмотки значительно отличается от намотки слоевой обмотки НН трансформатора НОМ-6 и заключается в следующем.

Устанавливают и закрепляют на шпинделе станка деревянный разрезной шаблон *2* (рис. 87). На шаблон наматывают лист электрокартона толщиной 0,5 *мм* в три оборота и край листа промазывают лаком. По краям полученного цилиндра из электрокартона наматывают выравнивающие концевые полосы *1* и их концы также подклеивают к цилиндру. На конец обмоточного провода *3* надевают хлопчатобумажный чулок, провод загибают, укладывают в вырезе щеки шаблона и закрепляют, обернув конец провода вокруг шпинделя.

Счетчик оборотов устанавливают на нуль и приступают к намотке обмотки. Поверх провода накладывают две петли из хлопчатобумажной ленты *4*, как показано на рис. 87, наматывают 5—6 витков, затягивают петли из ленты и закрепляют их, смазав их концы лаком и приклеив к виткам. Затем продолжают наматы-

вание обмотки по чертежу, наблюдая за тем, чтобы провод ложился ровно и плотно. За 5—6 витков до конца намотки под провод опять подкладывают две петли *4* из ленты для закрепления крайнего витка. После этого наматывают обмотку до конца, отрезают провод, наде-

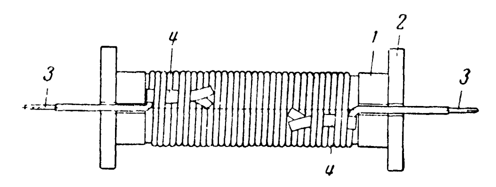


Рис. 87. Намотка слоевой обмотки НН трансформатора типа НОМ-35.

1 — концевая полоса из электрокартона; *2* — щека шаблона; *3* — обмоточный провод; *4* — петля из тафтяной ленты.

вают на него хлопчатобумажный чулок, продевают в петли, промазывают их бакелитовым лаком и затягивают.

Поверх обмотки наматывают лист электрокартона и бандажируют тафтяной лентой вполуперекрышку. Готовую обмотку снимают с шаблона и предъявляют работнику ОТК, который тщательно ее проверяет, т. е. производит наружный осмотр, проверяет по чертежу правильность выполнения вывода концов, проверяет по расчетной записке все размеры (внутренний и наружный диаметры и осевой размер) катушки и измеряет диаметр провода. После этого катушка направляется на контрольный пункт испытательной станции для проверки числа витков. Проверенную катушку отправляют в пропиточное отделение цеха, где ее пропитывают лаком ГФ-95 (глифталевым) и запекают. После пропитки обмотку направляют в сборочный цех трансформаторов.

б) Намотка обмоток ВН

Обмотка ВН выполняется катушечной. Общее строение обмоток ВН, а также НН показано на рис. 48. Обмотка ВН наматывается на бумажно-бакелитовый цилиндр ∅ 145/160×300 *мм* отдельно от обмотки НН. Бумажно-бакелитовый цилиндр *4* с надетыми на него промежуточными шайбами зажимается между двумя

щеками 2 (рис. 88) и закрепляется на шпинделе 5 обмоточного станка.

Шайбы из электрокартона расставляются с требуемыми промежутками, для чего между ними прокладываются временные (технологические) дистанционирующие гофрированные полосы из картона. Кроме того, на концах цилиндра устанавливаются временные дистанционирующие кольца 3, на месте которых затем устанавливаются емкостные кольца 3 (рис. 48).

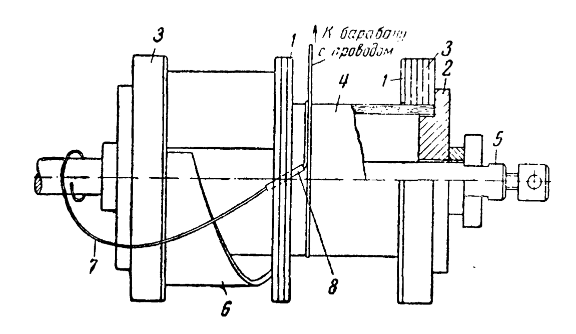


Рис. 88. Намотка катушечной обмотки ВН трансформатора типа НОМ-35.

1 — промежуточные шайбы из электрокартона; 2 — щека стальная; 3 — временное (технологическое) выравнивающее кольцо, склеенное из электрокартона; 4 — бумажно-бакелитовый цилиндр; 5 — шпиндель станка; 6 — временная дистанционирующая гофрированная полоса из электрокартона; 7 обмоточный провод; 8 — линоксиновая трубка.

Сначала наматывают правую по расположению катушку, т. е. мотают в том же порядке, как наматывается обмотка ВН трансформатора НОМ-6. Конец обмоточного провода 7 (рис. 88) ∅ 0,74 *мм* (усиленного сечения) с надетой на него линоксиновой трубкой 8, продевают под среднюю шайбу и закрепляют его, как показано на рис. 88. Устанавливают счетчик оборотов на нуль и наматывают первый слой катушки, предварительно положив полоску из электрокартона, выравнивающую этот слой. В конце слоя провод обрезают, припаивают обмоточный провод основного размера (∅ 0,2 *мм*) с другого барабана, изолируют лакотканью место пайки, кладут выравнивающую первый слой полоску электрокартона, затем кладут междуслойную изоляцию из трех полос кабельной бумаги и продолжают наматывать катушку. Междуслойная изоляция про-

кладывается после намотки каждого слоя. Верхняя из трех полос этой изоляции имеет загнутые края, как показано на рис. 36, между которыми укладываются слои обмоточного провода.

Перед намоткой последнего слоя катушки предварительно укладывают электростатический экран *8* (рис. 48), состоящий из алюминиевой фольги, наклеенной на полосу из электрокартона с загнутыми краями (электростатический экран отдельно показан на рис. 49). Поверх экрана кладут междуслойную изоляцию; конец последнего витка из провода ∅ 0,2 *мм* зачищают от изоляции и припаивают к проводу ∅ 0,74 *мм* марки ПЭЛБО; место пайки изолируют лакотканью и наматывают последний слой катушки. Чтобы экран плотно прилегал к катушке, намотка ее последнего слоя производится с помощью фибровой прокладки. Последний виток закрепляет петлями из хлопчатобумажной ленты, так же как это делается у обмотки НН (см. п. «а»), конец провода зачищают от изоляции, обрезают и припаивают к отводу от экрана; место пайки изолируют лакотканью.

Затем катушку вместе с бумажно-бакелитовым цилиндром и с щеками снимают с обмоточного станка, перевертывают вдоль оси на 180° и вновь устанавливают на станок.

К началу только что намотанной катушки припаивают обмоточный провод ∅ 0,74 *мм* с барабана, изолируют место пайки и затем наматывают вторую катушку, полностью повторив все технологические операции, выполненные при намотке первой катушки.

После того как вся обмотка ВН намотана, к каждой катушке припаивают емкостное кольцо *3* (рис. 48). Отвод емкостного кольца через вырез линоксиновой трубки припаивают к отводу экрана, к которому припаян также конец провода от обмотки. Место пайки изолируют лакотканью. Отвод от емкостного кольца, выполненный гибким проводом сечением 1,5 *мм*^{2} марки ПАМГ, служит одновременно и выводным концом обмотки ВН. Затем обмотку бандажируют тафтяной лентой вполуперекрышку.

После бандажировки обмотку снимают со станка и связывают в нескольких местах хлопчатобумажной лен-

той, подложив под нее деревянные опорные планки, прижимающие емкостные кольца к торцам катушек.

Готовую обмотку окончательно отделывают, обрезают и зачищают ее концы по чертежу, ставят клеймо и предъявляют работнику ОТК для полной проверки размеров, после чего ее отправляют в пропиточное отделение для предварительной сушки в вакуум-сушильном шкафу. После сушки обмотку ВН подают на контрольный пункт испытательной станции для проверки числа витков.

Сушка обмоток ВН на 35 *кв* и выше необходима, так как в противном случае вследствие наличия токов утечки проверка числа витков оказывается практически невозможной.

Из испытательной станции обмотку вторично отправляют в пропиточное отделение для пропитки лаком ГФ-95 в соответствии с инструкцией и последующего запекания. После выгрузки из печи обмоткам дают остыть и отправляют их в сборочный цех. Готовая обмотка показана на рис. 28.

26. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС НАМОТКИ ОБМОТОК КАСКАДНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ ТИПА НКФ-110-57

По конструкции обмотки всех типов каскадных трансформаторов сходны между собой; поэтому для описания технологического процесса их намотки может быть принята обмотка трансформатора типа НКФ-110-57, обмотка нижнего стержня *I* (нижней ступени каскада) которого показана на рис. 89. Обмотка верхнего стержня *II* отличается тем, что у нее отсутствуют обмотки НН (вторичные) — катушки *С* (основная) и *Т* (дополнительная). Кроме того, на стержне *I* катушка *П* (выравнивающая) должна быть правой намотки, а на стержне *II* — левой.

Все катушки ВН и НН слоевые.

Намотка катушки П (выравнивающей). Эта катушка наматывается в один слой круглым обмоточным проводом ∅ 3,05 *мм* марки ПБ на бумажно-бакелитовый цилиндр *1* размером ∅ 125/133×202 *мм*.

Порядок основных технологических операций следующий.

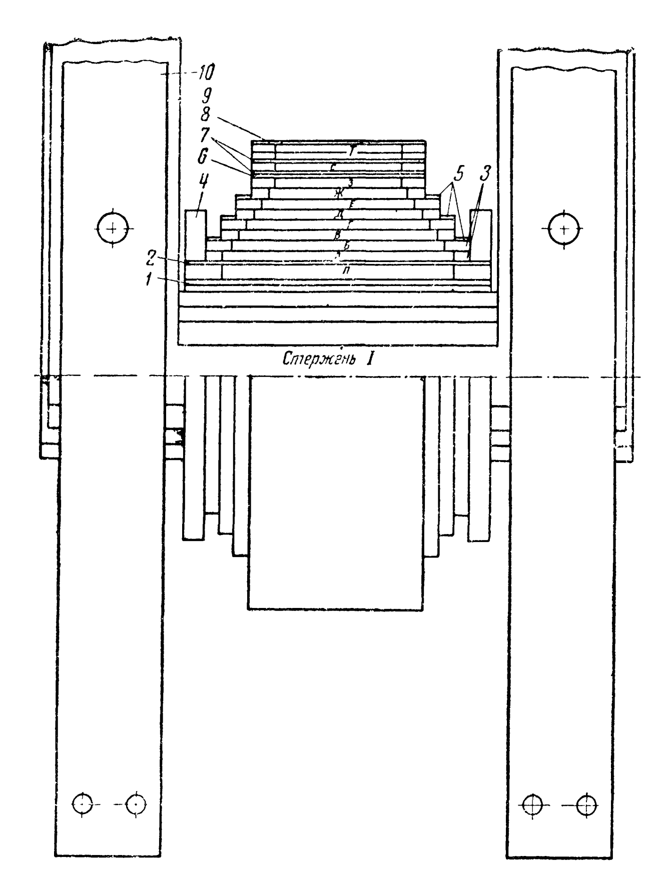


Рис. 89. Обмотка нижнего стержня I (каскада) трансформатора напряжения типа НКФ-110-57 в разрезе.

1 — бумажно-бакелитовый цилиндр; *2* — междуслойная изоляция из восьми листов кабельной бумаги; *3* — концевая изоляция в виде полос из электрокартона; *4* — временные (технологические) дистанционирующие гетинаксовые полукольца: *5* — полосы из кабельной бумаги, намотанные на толщину 2 *мм*, предупреждающие сдвиг катушек в осевом направлении; *6* — электростатический экран; *7* — листы из электрокартона; *8* — бандаж из тафтяной ленты; *9* — магнитопровод; *10* — прессующие планки (стойки) из древесно-слоистого пластика; *11* — выравнивающая обмотка; *А—З* — катушки первичной (ВН) обмотки; *С* — вторичная (НН) основная обмотка; *Т* — вторичная дополнительная обмотка.

Бумажно-бакелитовый цилиндр *1* устанавливают на шпиндель *4* обмоточного станка, зажав его между двумя щеками *2*, как это показано на рис. 90.

Обмоточный провод *5* пропускают через натяжное приспособление, изолируют лакотканью на длину 100 *мм*

и сгибают конец провода под прямым углом посередине изолированного участка.

Цилиндр промазывают бакелитовым лаком (для предупреждения смещения витков), по обоим его концам закрепляют с помощью тафтяной ленты несколько клиньев (полос) из электрокартона, толщина которых должна быть примерно равной диаметру наматываемого

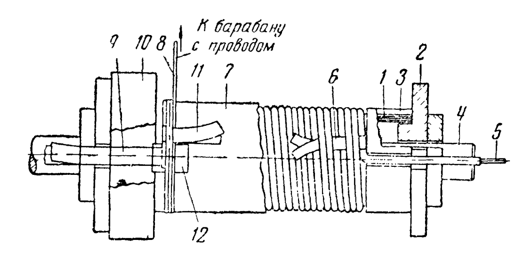


Рис. 90. Намотка слоевой выравнивающей обмотки *П* (правой) и начало намотки ВН нижней ступени каскада трансформатора напряжения типа НКФ-110-57.

1 — бумажно-бакелитовый цилиндр; *2* — щека; *3* — выравнивающие полосы из электрокартона; *4* — шпиндель станка; *5* — обмоточный провод обмотки *П*; *6* — петли из тафтяной ленты; *7* — междуслойная изоляция из кабельной бумаги; *8* — обмоточный провод обмотки ВН; *9* — вывод начала обмотки ВН из медной полосы, сложенной вдвое; *10* — временные дистанционирующие гетинаксовые полукольца; *11* — петля из тафтяной ленты; *12* — полоса из лакоткани.

провода с изоляцией (3,4 *мм*). Далее выводной конец провода укладывают в вырез щеки *2*, вблизи изгиба провода (на место первого витка) накладывают петли *6* из хлопчатобумажной (тафтяной) ленты и начинают намотку первых витков катушки *П* (правой).

Согласно правилам, по которым определяется направление намотки катушек, наматывание правых катушек (для нижних стержней магнитопровода) производят справа налево, а намотку левых катушек (для верхних стержней) — слева направо, если смотреть со стороны рабочего места, противоположного расположению барабана с медью, как показано на рис. 33.

Намотав 5—6 витков, затягивают ленточные петли, смазывают их концы бакелитовым лаком и продолжают намотку следующих витков, уплотняя их вдоль слоя фибровым клином. Не доходя 8—10 витков до конца слоя, снова подкладывают петли из тафтяной ленты и заканчивают намотку слоя, предварительно проверив по-

казание счетчика числа витков. Отмерив длину выводного конца по чертежу, провод обрезают, конец его изолируют, так же как и у начала катушки, продевают в петли, загибают и затягивают петли. Сверху катушку *П* вдоль оси смазывают бакелитовым лаком и на нее наматывают лист электрокартона в три слоя. Края последнего слоя электрокартона подклеивают лаком и бандажируют катушку тафтяной лентой в разгон. Сняв катушку со станка (вместе с цилиндром), временно связывают ее шпагатом, предъявляют контролеру для проверки размеров, производят также проверку числа витков, затем сушат катушку, пропитывают лаком ГФ-95 и запекают по инструкции.

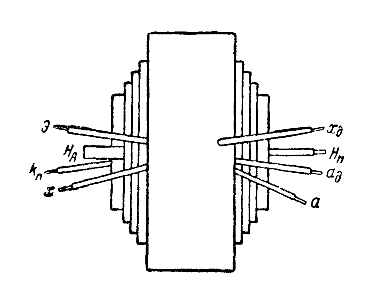


Рис. 91. Расположение выводных концов комплекта обмоток нижней ступени каскада трансформатора напряжения типа НКФ-110-57.

Начало и конец катушки *П* обозначаются соответственно $Н_п$ и $К_п$. Расположение концов показано на рис. 91.

Намотка обмотки ВН (каскада). Сняв с катушки *П* временную обвязку, закрепляют ее в щеках на шпинделе обмоточного станка. Обмотка ВН (состоящая из слоевых катушек *А*, *Б*, *В*, *Г*, *Д*, *Е*, *Ж*, *З*) наматывается на катушку *П* проводом марки ПЭЛШКО ∅ 0,25 *мм* (основной провод). Первый и последний слои обмотки ВН наматываются из провода *8* по рис. 90 ∅ 0,74 *мм* (увеличенного сечения). К концу провода ∅ 0,74 *мм* припаивается сложенная вдвое медная луженая лента *9* 0,3×15 *мм*, посредством которой выводится начало $Н_А$ обмотки ВН. Медную ленту изолируют лакотканью и тафтяной лентой, затем ее укладывают в вырез щеки *2*, как показано на рис. 90, накладывают выравнивающую полосу из электрокартона, вплотную к щекам на катушку *П* надевают временные гетинаксовые кольца *10* (разрезанные на полукольца и связанные лентой), фиксирующие осевой размер катушек *А* и *Б*, счетчик оборотов устанавливают на нуль и наматывают первый слой катушки *А*.

Провод ∅ 0,74 *мм* отрезают, припаивают к нему про-

вод основного размера (∅ 0,25 *мм*), место пайки изолируют лакотканью и намотанный слой промазывают бакелитовым лаком. На намотанный первый слой катушки *А* укладывают восемь листов междуслойной изоляции 7 из кабельной бумаги. Концы листов междуслойной изоляции сдвигают друг относительно друга на 10 *мм* по окружности для более равномерной укладки изоляции.

При намотке катушек ВН каждый слой всех катушек после намотки промазывают бакелитовым лаком, чтобы обмотка была плотной, монолитной и механически прочной.

Далее продолжают намотку катушек *А* и *Б*, укладывая после каждого слоя междуслойную изоляцию и контролируя по счетчику общее число намотанных витков по расчетной записке.

Закончив намотку катушки *Б*, с двух ее концов (поверх междуслойной изоляции) устанавливают следующие по размеру временные технологические полукольца, которые будут фиксировать осевой размер следующих катушек *В* и *Г* (на рис. 90 не показаны).

Так же мотают катушки *В* и *Г*, укладывая после каждого слоя междуслойную изоляцию, как было указано выше. После намотки катушек *В* и *Г* по концам катушки *Г* опять устанавливают временные гетинаксовые полукольца для выдерживания осевого размера следующих катушек *Д* и *Е*. Таким же образом наматывают катушки *Д*, *Е*, *Ж* и *З*. Последний слой катушки *З* наматывают проводом ∅ 0,74 *мм*, для чего в требуемом месте его припаивают к отрезанному от барабана основному проводу и место пайки изолируют лакотканью. Не доходя 10 витков до конца слоя, припаивают провод еще большего диаметра — 1,0—1,16 *мм*, подкладывают петли из тафтяной ленты, как было описано выше, доматывают слой катушки, обрезают провод, на конец его надевается хлопчатобумажный чулок и закрепляется в петле. На обмотку наматывают цилиндр из электрокартона в один слой.

С намотанной обмотки ВН снимают все технологические кольца, на выступы обмотки по ее торцам наматывают полосы из кабельной бумаги 5 (рис. 89), промазывая их в процессе намотки бакелитовым лаком, снимают со станка и предъявляют ОТК для осмотра и про-

верки размеров. После осмотра обмотку отправляют для сушки в пропиточное отделение, затем на контрольный пункт для проверки числа витков, затем снова в пропиточное отделение для пропитки лаком ГФ-95 и запекания лака.

Далее, на обмотку насаживают электростатический экран *6* из листовой латуни. Как указывалось выше, концы экрана во избежание образования короткозамкнутого витка не должны сходиться. Разрыв должен составлять 20—25 *мм*. Конец обмотки ВН (катушки *3*) должен выходить в месте разрыва экрана. Отводом от верхнего конца обмотки ВН служит многожильный голый провод марки ПАМГ сечением 10 *мм*^{2}, припаянный к экрану рядом с концом обмотки ВН (катушки *3*). Для удобства пайки гибкий провод расплетают на длине около 100 *мм* для того, чтобы все жилы, прилегающие к экрану, лежали в одной плоскости. Пайка производится оловянистым припоем марки ПОС-40 при помощи паяльника; место пайки зачищают стеклянной шкуркой.

Отвод от экрана, обозначаемый *Э*, расположение которого показано на рис. 91, изолируется лакотканью и затем тафтяной лентой. На экран кладется лист электрокартона *7* (рис. 89) и производится бандажирование тафтяной лентой.

На этом заканчивается намотка комплекта катушек для верхнего стержня *II* магнитопровода.

Наматывание обмоток НН С и Т. Комплект катушек для нижнего стержня *I* должен содержать еще две обмотки НН: *С* — основную и *Т* — дополнительную, наматываемые поверх экрана. Катушку *С* наматывают, выполняя те же операции, что и при намотке катушки *П*.

После намотки катушки *С* наматывают полосу электрокартона, временно завязав ее тафтяной лентой. Затем поверх электрокартона наматывают первый слой двухслойной катушки *Т*, так же как при наматывании катушки *С*, укладывают междуслойную изоляцию из электрокартона и наматывают второй слой катушки *Т*. Обрезав и закрепив конец провода, кладут лист электрокартона, сверху сплошь бандажируют тафтяной лентой *8* (рис. 89) и снимают обмотку со станка.

Начала и концы катушек *С* и *Т* обозначаются соответственно $Н_с$, $К_с$, $Н_т$ и $К_т$, присоединяемые при сборке трансформаторов к вводам — a, x, $a_д$ и $x_д$ соответствен-

но. Выводные концы во избежание путаницы в сборочном цехе должны быть отмечены ярлыками, повешенными на эти концы.

Во избежание сдвига катушек по их слоям вдоль оси выступающие торцы всех катушек промазывают бакелитовым лаком для склеивания краев междуслоевой изоляции, а затем обмотку туго связывают в трех-четырех местах киперной лентой в осевом направлении, подкладывая деревянные планки на выступы торцов. В таком виде комплект обмоток предъявляют ОТК, затем отправляют на контрольный пункт испытательной станции и еще раз подвергают сушке, пропитке и запеканию (согласно инструкции).

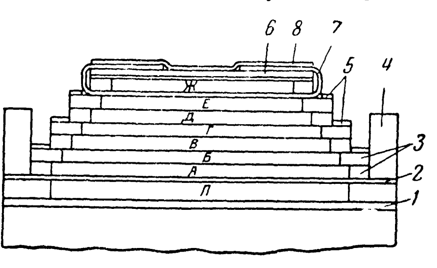


Рис. 92. Обмотка верхнего стержня трансформаторов напряжения НКФ-220-58 и НКФ-330 в разрезе.

1 — бумажно-бакелитовый цилиндр; *2* — междуслойная изоляция из кабельной бумаги; *3* — концевая изоляция в виде полос из электрокартона; *4* — временные дистанционирующие гетинаксовые полукольца; *5* — полосы из кабельной бумаги для предупреждения осевого сдвига катушек; *6* — электростатический экран; *7* — междуслойная изоляция увеличенной ширины с надрезанными краями, огибающая с торцов катушки *Ж*; *8* — бандаж из тафтяной ленты.

После выгрузки из печи обмотку отправляют в сборочный цех.

Обмотки трансформаторов типов НКФ-220-58, НКФ-330 и НКФ-500 наматываются таким же образом, как и обмотки НКФ-110-57.

Отличие в намотке состоит лишь в том, что у всех средних комплектов обмоток этих трансформаторов поверх экранов наматываются вместо вторичных связующие обмотки *Р*, технология намотки которых не отличается от намотки вторичных обмоток *С* и *Т*. Кроме того, у верхних комплектов обмоток трансформаторов НКФ-220-58, НКФ-330 и НКФ-500 верхние катушки *Ж* (у НКФ-500 — *Е*), наиболее сильно подвергающиеся воздействиям волн импульсов при перенапряжениях, имеют усиленную изоляцию с торцов и снаружи. Для этой цели междуслойная изоляция между катушками *Е* и *Ж* (у НКФ-500 — *Д* и *Е*) выполняется большей ширины. Выступающие края изоляции надрезаны и после намотки катушек *Ж* (или *Е*) и наложения экрана отги-

баются вверх и укладываются сверху на экран, как это показано на рис. 92, после чего вся обмотка бандажируется тафтяной лентой.

ГЛАВА ШЕСТАЯ

ИСПЫТАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

27. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

После окончательной сборки все трансформаторы напряжения подвергаются испытаниям для выявления дефектов, допущенных при их изготовлении, определения основных электрических характеристик и проверки их соответствия требованиям ГОСТ или техническим условиям. Некоторые трансформаторы напряжения подвергаются испытаниям также и в процессе их сборки.

Объем испытаний и их методы определяются требованиями ГОСТ, техническими условиями, а также в зависимости от вида испытания либо ГОСТ 3484-55, либо инструкцией 193-55 Государственного комитета стандартов, мер и измерительных приборов СССР по поверке измерительных трансформаторов.

По большинству видов испытаний трансформаторов напряжения методы испытаний не отличаются от методов испытания силовых трансформаторов.

Так, методы испытания обмоток и изоляции, измерения потерь и тока холостого хода, сопротивления обмоток постоянному току и сопротивления изоляции, а также вопросы организации работ и техники безопасности не отличаются от таковых для силовых трансформаторов[1]. Поэтому в данной главе будут рассмотрены лишь те испытания, методы которых в какой-то мере отличаются от методов испытания силовых трансформаторов.

28. ОБЪЕМ ИСПЫТАНИЙ

Прежде всего следует рассмотреть, на каких стадиях изготовления и в каком объеме трансформаторы напряжения подвергаются испытаниям.

---

[1] Подробнее об этих вопросах и методах испытаний см. [Л. 8].

У подавляющего большинства типов трансформаторов напряжения первичные обмотки (ВН) выполняются с большим числом витков, вследствие чего имеется большая вероятность ошибки в числе витков при изготовлении этих обмоток. Кроме того, как правило, обмотки ВН изготовляются из очень тонкого обмоточного провода (∅ 0,2—0,35 *мм*), в силу чего возможны его разрывы в процессе наматывания обмоток.

Для того чтобы исключить пропуск обмоток с дефектами на сборочные операции, целесообразно производить проверку числа витков и проверку отсутствия обрывов у всех обмоток трансформаторов напряжения вне зависимости от их габарита, напряжения и класса точности до установки их на магнитопровод.

В процессе сборки (после установки обмоток на магнитопровод) необходимо испытывать лишь каскадные трансформаторы напряжения типа НКФ и трансформаторные устройства емкостных трансформаторов напряжения типа НДЕ.

Испытание в процессе сборки остальных трансформаторов, в особенности при серийном производстве, не обязательно и при испытании обмоток до сборки даже нецелесообразно.

У каскадных трансформаторов напряжения типа НКФ необходимо до сборки испытать изоляцию выравнивающих обмоток, которые недоступны после окончательной сборки трансформатора, а также проверить правильность разметки концов (полярность) этих обмоток.

По объему испытаний трансформаторы напряжения могут быть разбиты на 6 групп:

1-я группа — трансформаторы напряжения двухобмоточные однофазные и трехфазные с первичным напряжением до 35 *кв*, с полной изоляцией начал и концов обмоток;

2-я группа — то же трехобмоточные;

3-я группа — трансформаторы напряжения с пониженной изоляцией конца обмотки (нейтрали);

4-я группа — каскадные трансформаторы напряжения с номинальным первичным напряжением $\frac{110}{\sqrt{3}}$ *кв*;

5-я группа — то же с номинальным первичным напряжением $\frac{154}{\sqrt{3}}$ *кв* и выше;

6-я группа — емкостные трансформаторы напряжения типа НДЕ.

Каждый трансформатор из перечисленных групп при условии предварительной проверки обмоток подвергается следующим испытаниям:

1-я группа (типы НОМ, НОС, НОК, НТС, НТМК — до 35 кв включительно). В процессе сборки испытаниям не подвергаются.

После окончательной сборки подвергаются следующим испытаниям в указанной последовательности: 1) измерение сопротивления изоляции; 2) проверка электрической прочности масла; 3) испытание изоляции приложенным напряжением; 4) испытание изоляции индуктированным напряжением; 5) измерение потерь и тока холостого хода; 6) проверка погрешностей; 7) измерение сопротивления обмоток постоянному току.

2-я группа (тип НТМИ до 18 кв включительно). В процессе сборки испытаниям не подвергается.

После окончательной сборки, кроме испытаний, перечисленных для 1-й группы, производится проверка напряжения на дополнительной вторичной (третьей) обмотке.

3-я группа (тип ЗНОМ до 35 кв включительно). В процессе сборки испытаниям не подвергается.

Объем испытаний после окончательной сборки такой же, как и для 1 — 2-й групп. Отличительной особенностью является то, что:

а) изоляция трансформатора не может быть полностью испытана приложенным напряжением и поэтому испытывается индуктированным напряжением соответствующего значения;

б) проверка погрешностей производится отдельно на основной и дополнительной вторичных обмотках.

4-я группа (тип НКФ 110 кв). После первой сборки производятся следующие испытания:

1) испытание изоляции выравнивающих обмоток; 2) опыт холостого хода; 3) проверка полярности выравнивающих обмоток.

После окончательной сборки производятся те же испытания, что и для 3-й группы.

5-я группа (НКФ 220—500 кв). Испытания производятся те же, что и у трансформаторов 4-й группы, с той лишь разницей, что испытание изоляции индуктирован-

ным напряжением может производиться не в собранном виде всего трансформатора, а каждого блока в отдельности.

6-я группа (НДЕ). Объем и методы испытания излагаются отдельно в § 34.

Величины испытательных напряжений трансформаторов напряжения отличаются от испытательных напряжений силовых трансформаторов.

Величины испытательных напряжений первичных обмоток трансформаторов напряжения согласно ГОСТ 1983-43 и ГОСТ 1516-60 приведены в табл. 10.

Таблица 10

Класс напряжения, *кв*	До 3	3	6	10	15	20	35	110	150	220
Испытательное напряжение $U_{эф}$	6,0	24	32	42	55	65	95	200	275	400

Вторичные обмотки (НН) трансформаторов напряжения, как основные, так и дополнительные, испытываются напряжением 2 *кв*. Из отличных от методов испытания, применяемых для силовых трансформаторов, ниже нами будут рассмотрены следующие методы испытания трансформаторов напряжения:

а) определение числа витков в обмотках;

б) измерение напряжения на дополнительной обмотке трансформаторов типа НТМИ;

в) предварительное испытание каскадных трансформаторов напряжения типа НКФ;

г) испытание изоляции каскадных трансформаторов напряжения типа НКФ-220-500;

д) измерение погрешностей;

е) испытание емкостных трансформаторов напряжения типа НДЕ;

ж) типовое испытание.

29. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА ВИТКОВ ОБМОТКИ

Методика проверки числа витков в обмотках трансформаторов напряжения принципиально не отличается от метода проверки числа витков обмоток силовых трансформаторов.

Как обмотки силовых трансформаторов, так и обмотки трансформаторов напряжения проверяются дифференциальным методом, т. е. путем сравнения с образцовой обмоткой на испытательном магнитопроводе, имеющем съемное ярмо.

Однако дополнительные требования к установкам для проверки числа витков обмоток трансформаторов напряжения обусловлены тем, что число витков в этих обмотках значительно больше, чем у обмоток силовых трансформаторов, а следовательно, чувствительность индикатора должна быть более высокая.

Это требование должно быть обеспечено не только без увеличения величины напряжения на один виток по сравнению с принятой для проверки обмоток силовых трансформаторов, но даже при более низкой его величине, с тем чтобы уменьшить общее напряжение на испытуемой и образцовой обмотках во время испытания.

В связи с этим использование в качестве индикатора ваттметра становится невозможным вследствие его недостаточной чувствительности при этих требованиях.

На Электрозаводе в качестве индикатора при определении числа витков в обмотках трансформаторов напряжения применяется ламповый индикатор по схеме полупериодного выпрямления, состоящий из лампы 6Н8 или 6Н9 и микроамперметра М-24 на 100 *мка* с внутренним сопротивлением около 700 *ом*.

Принципиальная схема такой установки показана на рис. 93.

Потенциометром *8* через понижающий трансформатор *4* напряжение накала лампы *5* устанавливается таким, чтобы стрелка микроамперметра *6* была смещена приблизительно на середину шкалы (условный нуль).

Показания прибора снимаются при двух направлениях полярности; переключение направления питающего тока производится посредством переключателя *7*.

При равенстве витков в образцовой и испытуемой обмотках *2* и *3* показания гальванометра в обоих случаях (при разной полярности) будут практически равны условному нулю, так как анодное напряжение $U_а$, зависимое от разностного напряжения $U_р$, будет равно нулю.

При неравенстве числа витков в испытуемой и образ-

цовой обмотках появится разностное напряжение $U_р$ и через обмотку микроамперметра будет проходить ток, обусловленный величиной анодного напряжения, который вызовет отклонение стрелки микроамперметра. При этом показания микроамперметра при разных полярностях могут быть различны.

Подбирая при помощи переключателя на отпайках образцовой обмотки такое число витков, при котором

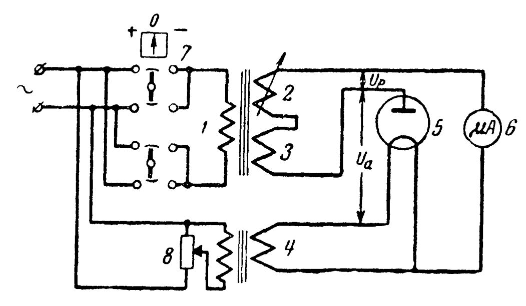


Рис. 93. Принципиальная схема индикатора с ламповым усилителем.

1 — обмотка возбуждения; *2* — то же образцовая; *3* — то же испытуемая; *4* — трансформатор накала; *5* — радиолампа; *6* — микроамперметр; *7* — переключатель полярности типа КФ; *8* — потенциометр.

$U_р=0$ и, следовательно, стрелка микроамперметра не будет отклоняться от условного нуля, определяют фактическое число витков испытуемой обмотки.

Если ошибка в витках испытуемой обмотки будет значительной, то стрелка микроамперметра может значительно выходить за пределы шкалы.

В этом случае надо уменьшить потенциометром *8* напряжение цепи накала и подобрать число витков на образцовой обмотке таким, при котором разностное напряжение $U_р$ будет близким к нулю.

Может быть применена и другая схема индикатора, применяемая на Электрозаводе и разработанная В. М. Моисеевым, с использованием поляризованного реле типа РП-5.

В этой схеме (рис. 94) поляризованное реле *4*, состоящее из электромагнита и прерывателя, используется в качестве механического выпрямителя, который выпрямляет разностное напряжение $U_р$. Выпрямленное

разностное напряжение измеряется микроамперметром 5 типа М-24 с пределом измерения 50 — 0 — 50 *мка*.

В цепь микроамперметра включается защитное сопротивление 6 (50—100 *ком*), которое в момент измерения шунтируется кнопкой 7, и регулируемое сопротивление 8 (3—3,5 *ком*), которым регулируется чувствительность микроамперметра в зависимости от испытуемой обмотки.

Напряжение (20—25 *в*) к катушке электромагнита

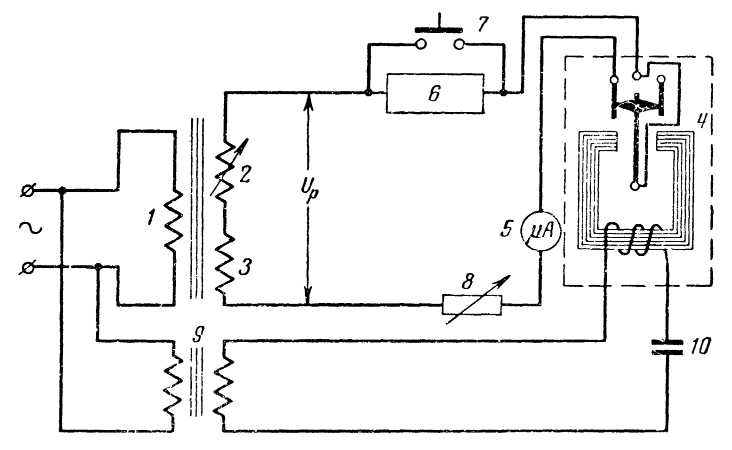


Рис. 91. Принципиальная схема индикатора с поляризованным реле.
1 — обмотка возбуждения; *2* — то же образцовая; *3* — то же испытуемая; *4* — поляризованное реле; *5* — микроамперметр; *6* — защитное сопротивление; *7* — шунтирующая кнопка; *8* — регулятор чувствительности; *9* — понижающий трансформатор; *10* — конденсатор.

поляризованного реле подводится от понижающего трансформатора 9.

В цепь питания поляризованного реле включается конденсатор *10* (0,2—0,3 *мкф*).

Конденсатор и величина подводимого напряжения подбираются такими, чтобы чувствительность микроамперметра была наибольшей и позволяла определять разностное напряжение, соответствующее 1 витку.

Как было указано выше, достоинством таких схем измерения является высокая чувствительность при достаточно низком напряжении на 1 виток, например 0,05 *в* на виток и даже ниже.

Вместе с тем эти схемы обладают тем недостатком, что вследствие значительного влияния рассеяния в стыке между ярмом и стержнями испытательного магнито-

провода на результаты измерения требуется внесение поправок в эти результаты.

Величина поправки зависит от равномерности магнитного потока по высоте стержней, взаимного расположения испытуемой и образцовой обмоток по высоте стержней, а также от плотности прилегания съемного ярма к торцовым поверхностям стержней, т. е. от зазора между ярмом и стержнем.

Для того чтобы исключить необходимость внесения поправки в результаты измерения или свести ее до наименьшего значения, следует при выполнении обмотки добиться наиболее равномерного распределения магнитного потока по всей высоте стержня и постоянно сохранять взаимное расположение по высоте стержней испытуемой и образцовой обмоток. Необходимо также добиваться наиболее плотного прилегания ярма к стержням.

Равномерность магнитного потока можно проверить контрольной катушкой с небольшим осевым размером (10—15 *мм*), к которой присоединен вольтметр с малым потреблением. При равномерном магнитном потоке показания вольтметра не должны изменяться в зависимости от перемещения контрольной катушки по высоте стержня.

Степень прилегания ярма можно проверить двумя контрольными катушками с одинаковым числом витков (1 500—3 000) с осевым размером 30—40 *мм*. Катушки насаживаются на разные стержни и проверяются вольтметром одна по отношению к другой.

При надлежащем прилегании ярма разности напряжений не будет. При наличии разности напряжений необходимо свести ее к нулю, так же как это делается при испытании обмоток, и определить разность в числе витков. Эта разность и будет являться поправкой. Проверка ведется в крайних и в двух-трех промежуточных положениях катушек по высоте стержней. Результаты этих измерений должны быть одинаковыми.

Величина поправки определяется при наладке установки, а затем периодически проверяется.

При очень тщательной наладке установки можно добиться четкой работы установки без поправки.

Если в процессе работы величина поправки изменится или если поправка отсутствовала и появится при ра-

боте, то необходимо установить причину и устранить ее. Обычно изменение величины поправки происходит вследствие ухудшения прилегания ярма, замыкания витков в обмотке возбуждения или ухудшения контактов в схеме установки. Несмотря на эти недостатки, применение обеих схем вполне себя оправдало.

30. ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ НА ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ОБМОТКЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТИПА НТМИ

Как было указано в гл. 1, трансформаторы типа НТМИ имеют дополнительную обмотку, соединенную в разомкнутый треугольник, два отвода которой $a_д$ и $x_д$ выводятся на крышку (рис. 6).

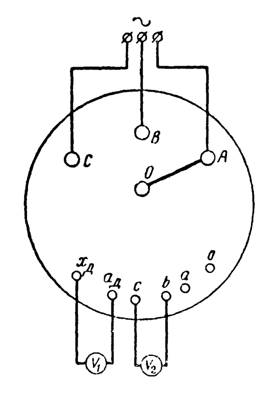


Рис. 95. Соединение вводов на крышке трансформатора типа НТМИ.

При холостом ходе и симметричном первичном напряжении напряжение на вводах разомкнутого треугольника не превышает нескольких вольт. Если же одна из фаз первичной обмотки или линии, к которой подключен трансформатор, замкнется на землю, то на вводах $a_д$ и $x_д$ разомкнутого треугольника дополнительной обмотки появится напряжение около 100 *в*. При этом включенное на зажимы этой обмотки реле отключает линию или подает необходимый сигнал.

При испытании к обмотке ВН трансформатора подводится симметричное номинальное напряжение, и в режиме холостого хода напряжение на вводах $a_д$ и $x_д$ дополнительной обмотки измеряется посредством вольтметра с малым потреблением. Измеренное напряжение не должно превышать 8 *в*. Затем напряжение снимается и вводы обмотки ВН *A* и *0* замыкаются, как это показано на рис. 95. После этого на обмотку ВН подается номинальное напряжение, которое контролируется вольтметром V_2, и снова вольтметром V_1 измеряется напряжение на вводах $a_д$ и $x_д$, величина которого должна быть в пределах 97—103 *в*.

Измерение производится дважды при замыкании накоротко любой из фаз по очереди.

31. ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ИСПЫТАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТИПА НКФ

Каскадные трансформаторы типа НКФ, помимо окончательных испытаний, подвергаются также и предварительным испытаниям после установки обмоток на магнитопровод.

При предварительном испытании необходимо проверить изоляцию выравнивающих обмоток (*П*) каждого элемента каскада, испытание которых после окончательной сборки трансформатора невозможно, так как они уже будут недоступны.

Испытание изоляции этих обмоток относительно корпуса и других обмоток производится приложенным напряжением 2 000 *в* в течение 1 *мин* от источника переменного тока с частотой 50 *гц*.

Опыт холостого хода производится при напряжении не более 50—60% номинального. Напряжение подводится к обмотке *Р*, один отвод которой заземляется, а один отвод обмотки ВН соединяется с магнитопроводом.

При этом испытании магнитопровод должен быть изолирован от пола.

При опыте холостого хода проверяется также полярность выравнивающих обмоток *П*. Для этого обмотки, находящиеся на разных стержнях магнитопровода, соединяются параллельно согласно схеме, указанной в расчетной записке или чертеже, и измеряются потери и ток.

Для контроля правильности измерения производится неправильное (встречное) соединение этих обмоток, при котором должны резко возрасти потери и ток при повышении напряжения.

32. ИСПЫТАНИЕ ИЗОЛЯЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ ТИПА НКФ 220 *кв* И ВЫШЕ

Контрольные испытания изоляции обмотки ВН трансформаторов типов НКФ-220-58, НКФ-330 и НКФ-500 целесообразно производить не на полностью собранном трансформаторе, а каждого блока в отдельности.

Испытание проводится индуктированным напряжением при повышенной частоте (100—250 *гц*).

Однако при раздельном испытании блоков должна учитываться некоторая неравномерность распределения

испытательного напряжения по блокам, которая получается при испытании трансформатора в целом. Поэтому величина испытательного напряжения каждого блока в отдельности устанавливается при типовом испытании изоляции полностью собранного трансформатора, при

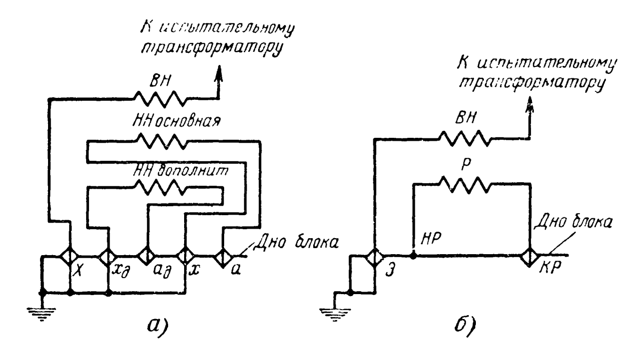


Рис. 96. Схема заземлений при испытании изоляции по блокам.

а — схема нижнего каскада нижнего блока; *б* — схема нижнего каскада среднего и верхнего блоков.

котором измеряется распределение напряжения по блокам.

На Московском электрозаводе установлены следующие испытательные напряжения при испытании по блокам:

НКФ-220 (154 *кв*) — нижний и верхний блоки по 140 *кв* $\left(\frac{275}{2}\cdot 1{,}02\right)$ каждый при частоте 100—250 *гц*;

НКФ-220 (220 *кв*) — нижний и верхний блоки по 200 *кв* $\left(\frac{400}{2}\right)$ каждый при частоте 100—250 *гц*;

НКФ-330 — нижний, средний и верхний блоки по 160 *кв* $\left(\frac{460}{3}\cdot 1{,}05\right)$ каждый при частоте 100—250 *гц*;

НКФ-500 — все четыре блока по 180 *кв* $\left(\frac{630}{4}\cdot 1{,}14\right)$ каждый при частоте 100—250 *гц*.

При испытании изоляции раздельно по блокам корпус (дно блока), вводы НН x и $x_д$ и ввод X ВН нижнего блока заземляются (рис. 96,*а*). При испытании среднего и верхнего блоков заземляются нижние основания (подставки) блоков и ввод *Э* обмотки ВН (рис. 96,*б*).

33. МЕТОДЫ ПОВЕРКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ

Как было указано в гл. 2, применение трансформаторов напряжения при измерениях вносит известные погрешности в результаты измерения, которые зависят от того, насколько отличается от 180° сдвиг вектора вторичного напряжения относительно вектора первичного и насколько отличается действительный коэффициент трансформации от номинального.

Как указано в § 4, отклонение действительного коэффициента трансформации от номинального, выраженное в процентах, называется погрешностью напряжения и определяется по формуле (1).

Отклонение от 180° сдвига вектора вторичного напряжения относительно вектора первичного напряжения называется угловой погрешностью и выражается в угловых минутах.

В зависимости от класса точности трансформатора напряжения ГОСТ устанавливает допустимые погрешности по напряжению и углу, которые приводятся в табл. 1 § 4.

При испытании трансформатор напряжения проверяется на соответствие погрешностей угловой и напряжения заданному классу точности.

При серийных испытаниях трансформаторов напряжения, с разрешения органов Государственного комитета стандартов, мер и измерительных приборов СССР, допускается производить измерение погрешностей только при номинальной нагрузке и 1,1 номинального напряжения; если имеются фактические данные зависимости изменения погрешностей от нагрузки и напряжения.

Для этого на основе ряда измерений выводят среднюю величину из измерений погрешностей на ряде однотипных трансформаторов при предельных условиях, т. е. измеряют погрешности при номинальной мощности и 1,1 номинального напряжения (f' и δ') и при нагрузке 0,25 $P_н$ и 0,9 номинального напряжения (f'' и δ'').

Разность между этими измерениями будет представлять собой изменение погрешности:

$$f''-f'=\Delta f; \tag{13}$$

$$\delta''-\delta'=\Delta\delta. \tag{14}$$

Зная эти изменения погрешностей, можно установить пределы допустимых погрешностей при номинальной нагрузке и 1,1 номинального напряжения, при которых трансформатор напряжения будет удовлетворять классу точности также и при нагрузке 0,25 $P_н$ и 0,9 номинального напряжения.

Поясним это положение на примере трансформатора напряжения типа НОМ-10 класса точности 0,5.

В табл. 11 приводятся результаты испытания трансформаторов.

Таблица 11

№ трансформатора	f'	δ'	f''	δ''	Δf.	$\Delta\delta$
1	—0,11	+19	+0,25	+13,5	0,36	—5,5
2	—0,07	+17	+0,35	+13	0,42	—4,0
3	—0,09	+18	+0,32	+13	0,41	—5,0
4	—0,11	+19	+0,26	+13	0,37	—6,0
5	—0,08	+17,5	+0,35	+13	0,43	—4,5
6	—0,09	+18	+0,32	+12,5	0,41	—5,5
7	—0,11	+18,5	+0,29	+13	0,40	—5,5
8	—0,09	+17	+0,27	+12	0,36	—5,0
9	—0,08	+16,5	+0,28	+13	0,36	—3,5
10	—0,09	+16,5	+0,29	+13	0,38	—3,5

В среднем $\Delta f=0{,}39\%$ и $\Delta\delta=-4{,}8'$.

Получив эти результаты, можно подсчитать, что если проводить измерение только при $P_н$, то при $0{,}25P_н$ трансформатор напряжения будет удовлетворять классу точности 0,5, если измеренные погрешности при нагрузке $P_н$ и $1{,}1U_н$ будут иметь значения:

по напряжению:

на верхнем пределе $f'=0{,}5-0{,}39=+0{,}11\%$;

на нижнем пределе $f'=-0{,}5\%$;

по углу:

на верхнем пределе $\delta'=+20'$;

на нижнем пределе $\delta'=4{,}8-20=-15{,}2'$.

В самом деле, если при измерении были получены значения погрешностей напряжения и угловой на верхних пределах $+0{,}11\%$ и $+20'$ соответственно, то фактические погрешности будут равны:

по напряжению $+0{,}11+0{,}39=+0{,}5\%$;
по углу $+20-4{,}8=+15{,}2'$.

При измеренных значениях на нижних пределах $-0{,}5\%$ и $-15{,}2'$ фактические погрешности будут равны:
по напряжению $-0{,}5+0{,}39=-0{,}11\%$;
по углу $-15{,}2-4{,}8=-20'$,
т. е. в обоих крайних случаях мы получим класс точности 0,5.

Если же измерения погрешностей выходят из указанных пределов, то надо произвести еще измерения при напряжении $0{,}9U_н$ и при нагрузке $0{,}25\,P_н$ и только после этого судить о годности трансформатора.

Поверка трансформаторов напряжения производится дифференциально-нулевым методом путем сравнения испытуемого трансформатора с образцовым, имеющим

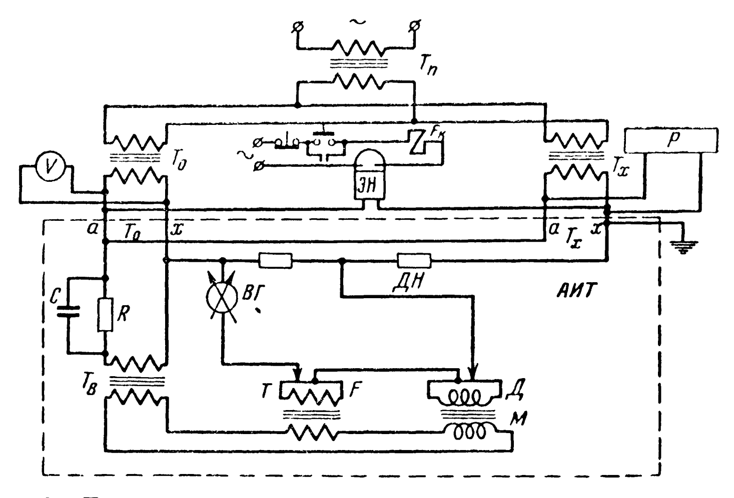


Рис. 97. Принципиальная схема измерения погрешности трансформатора напряжения путем сравнения с образцовым трансформатором.

$T_п$ — трансформатор повышающий; T_x — то же испытуемый; T_0 — то же образцовый трансформатор; $Э_н$ — реле напряжения; $Г_к$ — катушка главного контактора; $ВГ$ — вибрационный гальванометр; $Д_н$ — делитель напряжения; T — трансформатор измерительной цепи; F — реохорд измерительной цепи; M — фазосдвигающая схема; $Д$ — реохорд фазосдвигающей схемы; $T_в$ — вспомогательный трансформатор; C — конденсатор и R — сопротивление, включенные в цепь первичной обмотки трансформатора $T_в$; P — нагрузка вторичной обмотки испытуемого трансформатора.

такой же коэффициент трансформации и известные по величине погрешности.

В качестве дифференциального прибора, как правило, применяется аппарат типа АИТ.

На рис. 97 показана принципиальная схема поверки трансформатора напряжения.

Часть схемы, обведенная пунктирной линией, помещается в аппарате АИТ.

Первичные обмотки образцового T_0 и испытуемого T_x трансформаторов соединены одноименными вводами и питаются от повышающего трансформатора $T_п$.

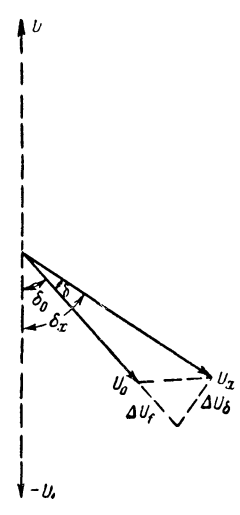


Рис. 98. Векторная диаграмма напряжения образцового и поверяемого трансформаторов.

Вторичные обмотки образцового и испытуемого трансформаторов подключаются к зажимам a и x аппарата АИТ.

В аппарате вторичные обмотки включаются навстречу друг другу через делитель напряжения ДН.

При разных значениях погрешностей образцового и испытуемого трансформаторов на делителе ДН появится разностное напряжение.

Одна из составляющих разностного напряжения ΔU_f совпадает по фазе с вторичным напряжением образцового трансформатора U_0 (рис. 98) и определяет разность погрешностей напряжения образцового и поверяемого трансформаторов:

$$f = f_x - f_0 = \frac{\Delta U_f}{U_0} \cdot 100\%. \qquad (15)$$

Другая составляющая разностного напряжения ΔU_δ, сдвинутая на четверть периода относительно напряжения U_0, определяет разность угловых погрешностей образцового и поверяемого трансформаторов:

$$\delta = \delta_x - \delta_0 = \frac{360 \cdot 60}{2\pi} \cdot \frac{\Delta U_\delta}{U_0} = 3\,440 \frac{\Delta U_\delta}{U_0}, \ \textit{мин.} \qquad (16)$$

Основными элементами измерительной цепи аппарата являются трансформатор T (рис. 97) с реохордом F и фазосдвигающая схема M с реохордом $Д$.

Эта цепь включается через вспомогательный трансформатор $T_в$ к вводам a и x вторичной обмотки образцового трансформатора T_0 и уравнивает на реохордах

часть разностного напряжения на делителе напряжения ДН.

Как показывает схема рис. 97, сопротивление R включено параллельно с емкостью C и эта система включена последовательно в цепь вторичной обмотки трансформатора $T_в$. Сопротивление R и емкость C подобраны таким образом, что ток вторичной обмотки совпадает по фазе с вторичным напряжением образцового трансформатора $T_о$, что обеспечивает совпадение по фазе напряжения на реохорде F с вторичным напряжением образцового трансформатора напряжения.

В качестве индикатора равновесия схемы применяется вибрационный гальванометр типа ВГ.

Разности погрешностей образцового и испытуемого трансформаторов читаются на шкалах аппарата АИТ после уравновешивания схемы.

Нагрузка P подключается к вторичной обмотке поверяемого трансформатора T_x.

Исходя из (15) и (16), вычисление погрешностей испытуемого трансформатора производят по следующим формулам:

$$f_x = f + f_о; \tag{17}$$

$$\delta_x = \delta + \delta_о, \tag{18}$$

где f_x — погрешность испытуемого трансформатора по напряжению;

δ_x — погрешность испытуемого трансформатора по углу;

f и δ — показания на шкалах аппарата АИТ;

$f_о$ — погрешность образцового трансформатора по напряжению;

$\delta_о$ — погрешность образцового трансформатора по углу.

Пример При проверке погрешности показания на шкалах аппарата АИТ были $f = -0{,}13\%$ и $\delta = +3{,}5'$.

Погрешности образцового трансформатора

$$f_о = +0{,}07\% \text{ и } \delta_о = -1{,}5'.$$

Тогда погрешности испытуемого трансформатора будут:

$$f_x = -0{,}13 + 0{,}07 = 0{,}06\%;$$

$$\delta_x = 3{,}5' - 1{,}5' = 2'.$$

Поверку погрешности трансформаторов напряжения производят с помощью приборов и другого оборудования, перечисленных ниже.

а) *Образцовый трансформатор напряжения.* В качестве образцового трансформатора напряжения следует применять трансформатор напряжения более высокого класса точности, чем поверяемый.

Как уже указывалось выше, коэффициенты трансформации образцового и поверяемого трансформаторов должны быть одинаковыми.

Образцовый трансформатор должен быть поверен и иметь свидетельство органов Государственного комитета стандартов, мер и измерительных приборов СССР.

В свидетельстве должны быть указаны погрешности трансформатора при фактической нагрузке, создаваемой схемой поверки при напряжениях 0,9; 1,0 и 1,1 номинального.

В качестве образцовых для поверки трансформаторов класса точности 0,5 можно применять трансформаторы напряжения класса точности 0,2 типа УТН-1 с номинальными напряжениями $\frac{380:\sqrt{3}-380-500}{100-100:\sqrt{3}-100:3}$ *в* и типа И-50 с номинальными напряжениями

$$\frac{3\,000-6\,000-10\,000-15\,000}{100-\frac{100}{\sqrt{3}}}\ в.$$

В тех случаях, когда нужны образцовые трансформаторы более высоких напряжений, их следует подобрать из числа трансформаторов класса точности 0,5 с наименьшей погрешностью (близкой к классу точности 0,2) при нагрузке, соответствующей нагрузке, создаваемой поверочной схемой (вольтметр и дифференциальный аппарат).

б) *Дифференциально-нулевой аппарат типа АИТ с встроенным вибрационным гальванометром типа* М501.

Аппарат позволяет производить измерение погрешностей по напряжению до 10% и по углу до 650′.

в) *Магазин нагрузочных сопротивлений Р типа НТН-1 для трансформаторов с номинальным вторичным напряжением 110 в или НТН-2 для трансформаторов с номинальным вторичным напряжением* $\frac{100}{\sqrt{3}}$ *в.*

Магазин сопротивления каждого типа представляет собой набор секций, которые могут включаться параллельно (рис. 99) при помощи штепселей, вставляемых в гнезда.

Каждая секция состоит из последовательно соединенных реактивного и активного сопротивлений, которые подобраны таким образом, что $\cos\varphi = 0{,}8$.

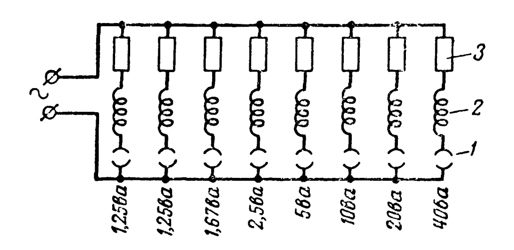


Рис. 99. Магазин нагрузочных сопротивлений.

1 — гнездо для включающего штепселя; *2* — реактивная составляющая нагрузки; *3* — активная составляющая нагрузки.

Магазин имеет две секции по 1,25 *ва* и по одной секции на 1,67; 2,5; 5; 10; 20 и 40 *ва*. Общая нагрузка магазина составляет 81,67 *ва*.

Если этой нагрузки недостаточно, то можно подключить параллельно несколько магазинов.

г) *Вольтметр V класса точности 0,5 для измерения вторичного (НН) напряжения на образцовом трансформаторе* T_0.

д) *Повышающий трансформатор* $T_п$ (рис. 97) *для питания схемы.*

е) Источник питания с плавным регулированием напряжения, с симметричным трехфазным напряжением для возможности поверки также и трехфазных трансформаторов напряжения частотой 50 *гц*.

Аппарат АИТ снабжен защитой в виде блинкера, который сигнализирует о неправильном подключении испытуемого и образцового трансформаторов (несоблюдение полярностей) или о неправильном выборе образцового трансформатора.

В этом случае на аппарат подается напряжение, равное не разности напряжений образцового и испытуемо-

го трансформатора, а их сумме, т. е. превышающее по величине расчетное напряжение аппарата.

Блинкер, встроенный в аппарат, не обеспечивает автоматического отключения, и поэтому не исключена возможность повреждения аппарата.

На Московском электрозаводе применяется схема, обеспечивающая при нарушении полярности, неправиль-

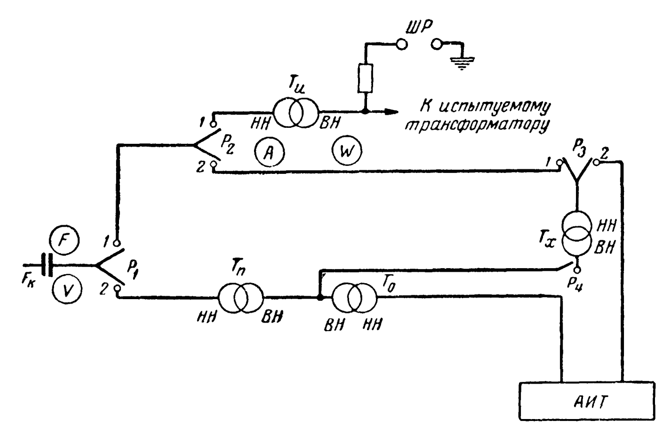


Рис. 100. Скелетная схема пульта испытания трансформаторов.

P_1, P_2, P_3, P_4 — разъединители; $Т_и$ — трансформатор испытательный; $Т_п$ — то же повышающий; $Т_0$ — то же образцовый; $Т_х$ — то же испытуемый.

ном выборе образцового трансформатора или грубом дефекте в испытуемом трансформаторе автоматическое отключение аппарата, если подводимое к нему напряжение превышает допустимое.

Схема, обеспечивающая отключение аппарата, состоит из реле напряжения типа ЭН 526/60, отрегулированного на 30 *в* (рис. 97).

Если подводимое напряжение превышает 30 *в*, то контакт реле *ЭН* разомкнется, катушка главного контактора $Г_к$ потеряет питание и подача напряжения на цепи схемы прекратится.

На рис. 100 показана скелетная схема пульта, обеспечивающая проведение испытания изоляции, измерение потерь и поверку погрешностей.

Включение пульта производится при помощи контак-

тора $Г_к$, а выбор схемы испытания — разъединителями P_1, P_2, P_3 и P_4.

При включении P_1 и P_2 в положение *1* включается испытательный трансформатор $T_и$, обмотка ВН которого присоединяется к замкнутой накоротко одной из обмоток испытуемого трансформатора.

Повышая постепенно величину напряжения при помощи соответствующего регулятора источника питания, доводят ее до установленной величины испытательного напряжения. Контроль величины напряжения ведется непосредственно шаровым разрядником по шарам *ШР* или вольтметром *V*, установленным на первичной стороне с учетом коэффициента трансформации испытательного трансформатора, отградуированным по шаровому разряднику.

При включении P_1 и P_3 в положение *1*, а P_2 в положение *2* измеряются потери и ток холостого хода испытуемого трансформатора T_x. Как правило, это измерение производится со стороны обмотки НН испытуемого трансформатора при 110% номинального напряжения. Измерение производится амперметром *A* и ваттметром *W*, включенными в схему испытания. При опыте холостого хода и при измерении погрешностей весьма существенно поддерживать номинальную частоту 50 *гц*, которая измеряется частотомером *F*.

При испытании изоляции и при опыте холостого хода разъединитель P_4 отключен.

Для проверки погрешностей P_1 и P_3 включаются в положение *2*. Включается также P_4, а P_2 отключается. В этой схеме напряжение подводится к обмотке НН повышающего трансформатора $T_п$, обмотка ВН которого подключена к обмоткам ВН испытуемого трансформатора T_x и образцового T_0. Обмотки НН испытуемого и образцового трансформаторов подключаются к аппарату АИТ. Повысив напряжение до требуемого значения, поверяют погрешность испытуемого трансформатора. Нагрузка подключается к обмотке НН испытуемого трансформатора.

Выбор схемы для отдельных испытаний может быть сведен в табл. 12.

На практике может быть применена и другая схема измерения погрешностей, в которой вместо образцового

Таблица 12

Вид испытания	Положение разъединителей			
	P_1	P_2	P_3	P_4
Испытание изоляции	1	1	Откл.	Откл
Опыт холостого хода	1	2	1	„
Поверка погрешностей	2	Откл.	2	Вкл.

трансформатора используется реактивный (емкостный) делитель высокого напряжения.

Схема с реактивным делителем применяется на московском Электрозаводе по рекомендации Всесоюзного научно-исследовательского института Государственного комитета стандартов, мер и измерительных приборов СССР для измерения погрешностей при контрольных испытаниях трансформаторов напряжения на 400—500 *кв*. Параметры установки, используемой московским Электрозаводом, позволяют производить измерения погрешностей у трансформаторов напряжения при напряжениях на стороне ВН от 20 до $\frac{500}{\sqrt{3}}$ *кв* и на стороне НН от 20 до 120 *в*.

Точность определения погрешности по напряжению $\pm 0,1\%$ и по углу $\pm 1-1,5$ *мин*.

Принципиальная схема установки — см. рис. 101.

Установка состоит из конденсатора C_1 высокого напряжения, который наполнен азотом под давлением, двух магазинов емкостей C_2 и C_3 низкого напряжения и аппарата АИТ.

От вспомогательного повышающего трансформатора $T_п$ подается требуемое напряжение (0,9; 1,0 или 1,1 номинального напряжения) на обмотку ВН испытуемого трансформатора T_x, а на емкостный делитель, состоящий из емкостей C_1 и C_2, подается суммарное напряжение обмоток ВН и НН испытуемого трансформатора T_x.

Разность между напряжением обмотки НН испытуемого трансформатора и падением напряжения на емкости C_2 определяется по падению напряжения на емкости C_3 аппаратом АИТ, включенным по схеме потенциометра переменного тока.

Подбор емкостей C_2 и C_3 производится по формулам (приведенным в отчете ВНИИК по описываемой установке):

$$C_2 = C_1 K_н, \quad (19)$$

где $K_н$ — коэффициент трансформации испытуемого трансформатора;

$$C_3 = 49\ C_2. \quad (20)$$

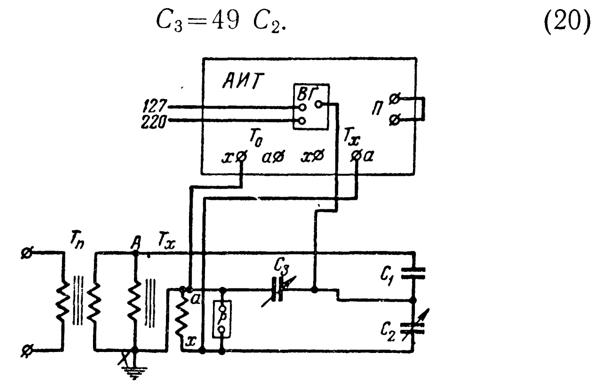


Рис. 101. Принципиальная схема измерения погрешностей с образцовым емкостным делителем.

$T_п$ — трансформатор повышающий; T_x — то же испытуемый; C_1 — образцовый конденсатор высокого напряжения; C_2 и C_3 — магазины емкостей низкого напряжения; P — нагрузка.

Определение погрешностей испытуемого трансформатора производится по следующим формулам:

$$f = af'\left(1 + \frac{C_3}{C_2}\right) + f_C; \quad (21)$$

$$\delta = a\delta'\left(1 + \frac{C_3}{C_2}\right) + \delta_C, \quad (22)$$

где f' и δ' — отсчеты по шкалам аппарата АИТ при равновесии схемы;

f_C и δ_C — поправки образцового делителя напряжения;

a — предел измерения потенциометра.

При пределе измерения 20 *мв* $a=0{,}02$, выражения (21) и (22) приобретают вид,

$$f=f'+f_C; \qquad (23)$$

$$\delta=\delta'+\delta_C, \qquad (24)$$

так как $1+\frac{C_3}{C_2}=50$.

При работе по этой схеме измерительная цепь потенциометра переменного тока не должна заземляться.

34. ИСПЫТАНИЕ ЕМКОСТНОГО ТРАНСФОРМАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ ТИПА НДЕ

Как было указано в гл. 4, емкостный трансформатор напряжения состоит из однофазного понижающего трансформатора *Т* (рис. 73), компенсирующего реактора *Р*, встроенного в один бак с трансформатором, высокочастотного заградителя *З* и емкостного делителя, который состоит из конденсатора связи C_1 и конденсатора отбора мощности C_2.

При помощи встроенных переключателей $П_т$ и $П_р$ может изменяться число витков обмотки трансформатора и обмотки реактора.

После полной сборки и запайки схемы трансформаторного устройства (трансформатор и реактор) и до спускания его в бак необходимо измерением коэффициента трансформации и сопротивления обмоток постоянному току проверить правильность подключения к переключателям ответвлений обмоток трансформатора и реактора.

Кроме того, необходимо измерить и «подогнать» индуктивность реактора в соответствии с требованиями расчета и технических условий. Подгонка производится при установке переключателя реактора $П_р$ в среднее положение *4*.

Для определения индуктивности к реактору подводится напряжение не менее 30% от номинального и измеряется ток. Величина индуктивности определяется по отношению напряжения и тока:

$$L=\frac{U}{\omega I}, \text{ гн}, \qquad (25)$$

где U — напряжение, подводимое к реактору при испытании;

I — ток, измеренный в реакторе в амперах при напряжении U;

$\omega = 2\pi f = 314$ при частоте $f = 50$ *гц*.

В тех случаях, когда измеренная индуктивность не соответствует расчету и техническим условиям, ее следует «подогнать» к заданной величине.

«Подгонка» индуктивности производится изменением высоты зазора в магнитопроводе.

Зная расчетную и фактическую индуктивности и расчетную высоту зазора, можно с достаточной точностью определить необходимое изменение зазора.

Исходя из того, что отношение индуктивностей приблизительно обратно пропорционально отношению высот зазоров, можно определить фактическую величину зазора $\Delta_ф$:

$$\Delta_ф = \frac{L_р}{L_и} \Delta_р, \text{ мм}, \tag{26}$$

где $L_р$ и $L_и$ — расчетная и измеренная индуктивности;

$\Delta_р$ — расчетная высота зазора, *мм*.

Определив $\Delta_ф$, можно найти и необходимое изменение высоты зазора Δ:

$$\Delta = \Delta_р - \Delta_ф. \tag{27}$$

Значение Δ может быть получено со знаком плюс или минус.

При знаке плюс высоту зазора надо увеличить, а при знаке минус — уменьшить на величину Δ.

Пример. У реактора трансформаторного устройства емкостного трансформатора напряжения типа НДЕ-500 при проверке индуктивности были измерены на четвертом (среднем) положении переключателя: напряжение 670 *в* и ток 0,0219 *а*; следовательно, индуктивность составит согласно выражению (25):

$$L = \frac{670}{0{,}0219 \cdot 314} = 97{,}4 \text{ гн}.$$

Согласно расчету индуктивность реактора должна составить 85,6 *гн* с допуском ±2%.

Следовательно, полученные результаты являются неудовлетворительными, и путем изменения (в данном случае — увеличения)

высоты зазора надо «подогнать» индуктивность к ее расчетному значению.

Расчетная высота зазора реактора Δр составляет 1,74 *мм*.

Согласно (26) определяем фактическую высоту зазора:

$$\Delta_р = \frac{85,6}{97,4}\cdot 1,74 = 1,53 \text{ мм}.$$

Согласно (27) высоту зазора надо изменить на

$$\Delta = 1,74 - 1,53 = +0,21 \text{ мм},$$

т. е. ее надо увеличить на 0,21 *мм*, что осуществляется подкладкой тонкой изоляционной прокладки в стыках стержней.

После определения индуктивности на четвертом положении переключателя $П_р$ проверяется индуктивность на остальных его положениях, которая должна соответствовать расчетным данным с учетом допусков.

После окончательной сборки и заливки маслом трансформаторное устройство подвергается испытаниям без емкостного делителя.

Помимо повторения испытаний, проведенных до опускания в бак, производятся еще следующие испытания:

1) опыт холостого хода;
2) опыт короткого замыкания;
3) испытание электрической прочности масла;
4) измерение сопротивления изоляции обмоток;
5) испытание изоляции.

Все испытания, кроме испытания изоляции, производятся теми же методами, что и при испытании силовых трансформаторов.

Главная изоляция обмотки ВН понижающего трансформатора (и одновременно обмотки реактора) испытывается индуктированным напряжением при напряжении на вводе A 55 *кв* и заземленном вводе X_1 при частоте 400 *гц*.

Для проведения этого испытания при частоте 50 *гц* трансформатор надо было бы значительно перевозбудить, так как при номинальном напряжении обмотки ВН 12 030 *в* на линейном вводе требуется получить напряжение 55 000 *в*, т. е. трансформатор надо перевозбудить в

$$\frac{55\,000}{12\,030} = 4,55 \text{ раза}.$$

Это вызвало бы чрезмерно большой, опасный для обмотки намагничивающий ток. Поэтому испытание проводится при частоте 400 *гц*, что уменьшает индукцию в магнитопроводе трансформатора в $400:50=8$ раз.

Обмотки НН и ввод X_1 испытываются приложенным напряжением 2 000 *в* при частоте 50 *гц*.

После испытания трансформаторного устройства необходимо определить погрешности емкостного трансформатора напряжения, собранного вместе с емкостным делителем.

При этом необходимо учесть, что чем точней будут подобраны характеристики емкостного делителя трансформатора напряжения, тем меньше будут его погрешности.

Поэтому до сборки делителя надо тщательно проверить емкость всех конденсаторов, составляющих емкостный делитель трансформатора напряжения.

По расчету делитель должен быть подобран со следующими данными: четыре последовательно соединенных конденсатора связи с емкостью каждого из них 18 600 *пф*, образующие верхнюю часть делителя с общей емкостью

$$C_1=\frac{18\,600}{4}=4\,650\ пф,$$

и один конденсатор отбора емкостью

$$C_2=107\,000\ пф.$$

Коэффициент деления делителя K_C составит:

$$K_C=\frac{4\,650+107\,000}{4\,650}=24,$$

что обеспечивает напряжение на вводах трансформатора, подсоединяемых к делителю, при включении делителя на напряжение $\frac{500\,000}{\sqrt{3}}$ *в*:

$$\frac{500\,000}{1,73\cdot 24}=12\,030\ в.$$

В тех случаях, когда характеристики емкостного делителя (C_1, C_2, K_C) несколько отличаются от расчетных, погрешность устройства может быть скомпенсирована

изменением числа витков обмоток трансформатора и реактора при помощи встроенных переключателей $\Pi_т$ и $\Pi_р$.

Подведя номинальное напряжение $\frac{500}{\sqrt{3}}$ *кв* (через соответствующий промежуточный повышающий трансформатор) к точкам *Л* и *Е* (рис. 75,*а*) емкостного делителя и измерив его через трансформатор напряжения, измеряют затем вольтметром вторичное напряжение испытуемого емкостного трансформатора напряжения и путем изменения числа витков в обмотке ВН понижающего трансформатора переключателем $\Pi_т$ выбирают такое его положение, при котором коэффициент трансформации всего трансформатора был бы близок к номинальному.

После этого приступают к измерению погрешности.

При выбранном положении переключателя $\Pi_т$ подбирают положение переключателя $\Pi_р$, при котором емкостный трансформатор напряжения удовлетворяет требованиям класса *1* (табл. 1) по напряжению и углу при нагрузках, равных $P_н$ и 0,25 $P_н$.

Если при выбранном ранее положении переключателя $\Pi_т$ не удается добиться удовлетворительных результатов, следует перейти на другую его ступень и повторить измерения при разных положениях переключателя $\Pi_р$.

Окончательно выбранные положения переключателей $\Pi_т$ и $\Pi_р$ для данного делителя указываются в паспорте емкостного трансформатора напряжения. Схема измерения погрешности и подсчет результатов производятся так же, как было описано в § 33.

В тех случаях, когда в процессе эксплуатации возникает необходимость в замене делителя емкостного трансформатора напряжения (повреждение одного из конденсаторов или другая причина) с соответствующим изменением коэффициента деления по сравнению с подобранным на заводе, в паспорте завода указывается необходимое положение переключателя $\Pi_т$ для других коэффициентов деления.

Так, например, при выпуске с завода емкостный делитель подобран с коэффициентом деления

$$K_C = \frac{C_1 + C_2}{C_1} = 24{,}45$$

при установленном переключателе $П_р$ реактора на первое положение и переключателе $П_т$ трансформатора на четвертое положение при заземлении ввода X_2. В заводском паспорте дополнительно дается рекомендация о выборе положения (ступени) переключателя $П_т$ трансформатора и для других коэффициентов деления, как показано в табл. 13. Ступень переключателя $П_р$ реактора в этом случае не меняется.

Таблица 13

K_C		Ступень переключателя $П_т$ трансформатора	Нейтраль обмотки ВН	K_C		Ступень переключателя $П_т$ трансформатора	Нейтраль обмотки ВН
от	до			от	до		
22,28	22,48	1	X_1	23,68	23,88	1	X_2
22,48	22,68	2	X_1	23,88	24,08	2	X_2
22,68	22,88	3	X_1	24,08	24,28	3	X_2
22,88	23,08	4	X_1	24,28	24,48	4	X_2
23,08	23,28	5	X_1	24,48	24,68	5	X_2
23,28	23,48	6	X_1	24,68	24,88	6	X_2
23,48	23,68	7	X_1	24,88	25,08	7	X_2

Из табл. 13 видно, что если после выпуска трансформатора с завода был заменен весь делитель полностью или один из его конденсаторов, в результате чего изменился коэффициент деления K_C, то необходимо соответственно изменить ступень переключателя $П_т$ трансформатора и нейтраль (вводы X_1 и X_2).

Например, если в результате замены конденсаторов коэффициент деления K_C стал равным 23,95 вместо 24,25, то переключатель трансформатора $П_т$ надо переставить с положения *4* в положение *2*.

Если же коэффициент деления почему-либо стал равным 23,35, то переключатель трансформатора $П_т$ надо поставить в положение *6*, а для нейтрали вместо ввода X_2 использовать ввод X_1.

Высокочастотный заградитель *З* испытывается отдельно. В объем его испытания входит измерение индуктивности и сопротивления постоянному току по общепринятой методике.

35. ТИПОВОЕ ИСПЫТАНИЕ

При типовом испытании, помимо всех контрольных испытаний, снимают ряд кривых, которые характери-

зуют изменение погрешностей в зависимости от нагрузки и подводимого напряжения.

На Электрозаводе принято при типовых испытаниях определять погрешности при следующих условиях:

а) по напряжению при 0,9; 1,0 и 1,1 номинального напряжения;

б) по нагрузке при 0,25; 0,5 и 1,0 номинальной мощности, а также при холостом ходе; коэффициент мощности нагрузки 0,8.

При типовых испытаниях снимается также кривая холостого хода для определения зависимости изменения потерь, мощности и тока холостого хода от подводимого напряжения.

Кривая снимается при напряжениях от 0,2—0,4 $U_н$ до 1,2—1,3 $U_н$.

Так же как и при типовых испытаниях силовых трансформаторов, при типовых испытаниях трансформаторов напряжения проводится испытание на нагревание.

Так как мощность трансформаторов напряжения невелика, то испытание на нагревание ведется методом непосредственной нагрузки.

За номинальную нагрузку трансформатора напряжения, с точки зрения нагревания, принимается нагрузка, соответствующая его максимальной мощности, причем нагружается основная обмотка НН, а к обмотке ВН подводится напряжение, равное $U_н$. Продолжительность испытания и методы определения температур ничем не отличаются от принятых для силовых трансформаторов.

Трехобмоточные трехфазные трансформаторы напряжения НТМИ, схема которых дана на рис. 6, при типовом испытании подвергаются, кроме того, длительному (4—6 *ч*) испытанию в режиме холостого хода при замыкании одной из фаз обмотки ВН на нуль. При этом к обмотке ВН подводится трехфазное напряжение, равное 1,1 $U_н$.

Однофазные трехобмоточные трансформаторы напряжения, предназначенные для работы в сетях с изолированной нейтралью с линейным номинальным напряжением до 35 *кв* включительно (типа ЗНОМ), при типовых испытаниях должны длительно (4—6 *ч*) выдерживать напряжение, в $\sqrt{3}$ раз бóльшее своего номинального напряжения, при частоте 50 *гц*.

Это требование обусловлено тем, что при замыкании на землю одной из фаз (например, A) линии каждая из двух других фаз (B и C) трансформатора напряжения оказывается под линейным напряжением (рис. 9).

Так как номинальным напряжением трансформаторов типа ЗНОМ является напряжение в $\sqrt{3}$ раз меньше линейного (т. е. фазное), то напряжение на обмотках двух трансформаторов напряжения из трех оказывается в $\sqrt{3}$ раз больше номинального. В условиях эксплуатации трансформаторы напряжения типа ЗНОМ должны длительно (до устранения замыкания линии на землю) выдерживать такое напряжение без повреждения.

После этого испытания трансформатор следует подвергнуть повторным контрольным испытаниям, а затем вынуть из бака и осмотреть с тем, чтобы убедиться в его работоспособности и отсутствии повреждений в результате испытания с замыканием одной фазы обмотки ВН на нуль и подачи на первичную обмотку трансформатора напряжения в $\sqrt{3}$ раз больше номинального.

Трансформаторы напряжения должны подвергаться также типовым импульсным испытаниям изоляции [1] в соответствии с требованиями ГОСТ 1516-60.

Периодичность типовых испытаний устанавливается ГОСТ или техническими условиями.

Каждый вновь разработанный тип трансформатора, помимо типовых испытаний, подвергается испытаниям в органах Государственного комитета стандартов, мер и измерительных приборов СССР для подтверждения его соответствия требованиям, предъявляемым к измерительным приборам.

На право выпуска каждого типа трансформатора напряжения органами Комитета стандартов, мер и измерительных приборов СССР после государственных испытаний выдается специальное свидетельство.

Каждый выпускаемый заводом трансформатор напряжения должен иметь государственное клеймо, удостоверяющее его доброкачественность.

Клеймение производится органами Комитета или по специальному решению органов Комитета отделом технического контроля завода.

---

[1] См. [Л. 9].

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

РАСЧЕТ ПОГРЕШНОСТЕЙ

Расчет погрешностей является заключительным этапом расчета трансформатора напряжения и производится после окончания электромагнитного расчета, выполняемого для трансформатора напряжения аналогично расчету обычного силового понижающего трансформатора.

Характерным для электромагнитного расчета трансформатора напряжения является то, что нагрузочные характеристики трансформатора $P_к$ и $U_к$ определяются для мощности, соответствующей высшему классу точности 0,5. Плотности тока в обмотке для этой мощности выбираются порядка 0,2—0,3 *а/мм*^{2}, причем для первичной обмотки значение плотности тока часто приходится брать еще ниже, для того чтобы диаметр провода, по соображениям его механической прочности, не был слишком мал. Обычно выбирают провод диаметром не менее 0,2 *мм*.

Ниже приводится методика расчета однофазного, трехфазного и трехфазного пятистержневого трансформаторов напряжения.

Для расчета погрешностей трансформатора напряжения необходимы следующие данные, известные из электромагнитного расчета:

1) Длины средних линий магнитного потока в стержне магнитопровода $L_с$ и в ярме $L_я$, которые требуются для определения намагничивающих сил и их активных составляющих.

2) Активные сечения стержня $Q_с$ и ярма $Q_я$.

3) Значения магнитной индукции в сечениях стержня и ярма.

4) Активные и реактивные падения напряжения отдельно для первичной ($U_{а1}$ и $U_{р1}$) и суммарно для обеих ($U_а$ и $U_р$) обмоток, причем реактивное падение напряжения $U_{р1}$ первичной обмотки условно берется равным половине общего $\left(U_{р1} = \frac{U_р}{2}\right)$.

Активные потери приводятся к условной температуре, равной +50° С (постоянный коэффициент, вводимый в формулу потерь мощности, берется равным 2,21).

5) Намагничивающая сила F_2, соответствующая току вторичной обмотки I_2 для мощности высшего класса точности 0,5.

Соответственно требованиям ГОСТ расчеты погрешностей производятся для значений первичного напряжения, составляющих 0,9 и 1,1 номинального, для мощностей, соответствующих всем трем

классам точности — 0,5; 1 и 3 и при коэффициенте мощности нагрузки $\cos\varphi_2=0{,}8$.

Расчет погрешностей однофазного броневого трансформатора напряжения целесообразно производить в следующем порядке.

Сначала определяются длины средней линии магнитной индукции в магнитопроводе, отдельно для стержней $L_с$ и для ярм $L_я$.

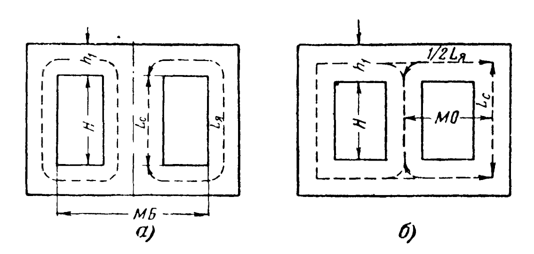


Рис. 102. Длина средней линии магнитного потока.

а — в однофазном броневом магнитопроводе; *б* — в трехфазном стержневом магнитопроводе; $L_с$ — длина средней линии в стержне, *см*; $L_я$ — то же в ярме, *см*; H — длина стержня, *см*; *МБ* — расстояние между боковыми ярмами, *см*; *МО* — расстояние между осями стержней, *см*; h_1 — высота ярма *см*.

Длина средней линии в стержне $L_с$ принимается равной высоте окна H, т. е. $L_с=H$ *см* (см. рис. 102,*а*). Длина средней линии в ярмах принимается равной

$$L_я=H+МБ+2h_1,\ см,$$

где H, *МБ* и h_1 — см. табл. 3 и рис. 38,*а*.

Кроме того, исходя из плана шихтовки магнитопровода, определяется число стыков (зазоров) между пластинами магнитопровода; для сечения стержня число стыков обозначаем через $n_с$, а для сечения ярма $n_я$. Для броневого магнитопровода имеем $n_с=1$; $n_я=3$ (рис. 102,*б*).

Затем по формулам (28) и (29) определяются полная намагничивающая сила (н. с.) F_m и ее активная составляющая $F_а$ для магнитных индукций, соответствующих значениям $V=0{,}9$ и $V=1{,}1$, где V — значение напряжения в долях номинального:

$$F_m=H_{mс}L_с+H_{mя}L_я+n_сF_{ст.с}+n_яF_{ст.я};\qquad(28)$$

$$F_а=H_{а.с}L_с+H_{а.я}L_я,\qquad(29)$$

где $H_{mс}$ и $H_{mя}$ — значения напряженностей магнитного поля в стержне и в ярме;
$F_{ст.с}$ и $F_{ст.я}$ — значения н. с. на один стык пластин стержня и ярма;
$H_{а.с}$ и $H_{а.я}$ — значения активных составляющих напряженности магнитного поля в стержне и ярме.

Значения H берутся по кривым рис. 103 для данного сорта стали в зависимости от величины индукции.

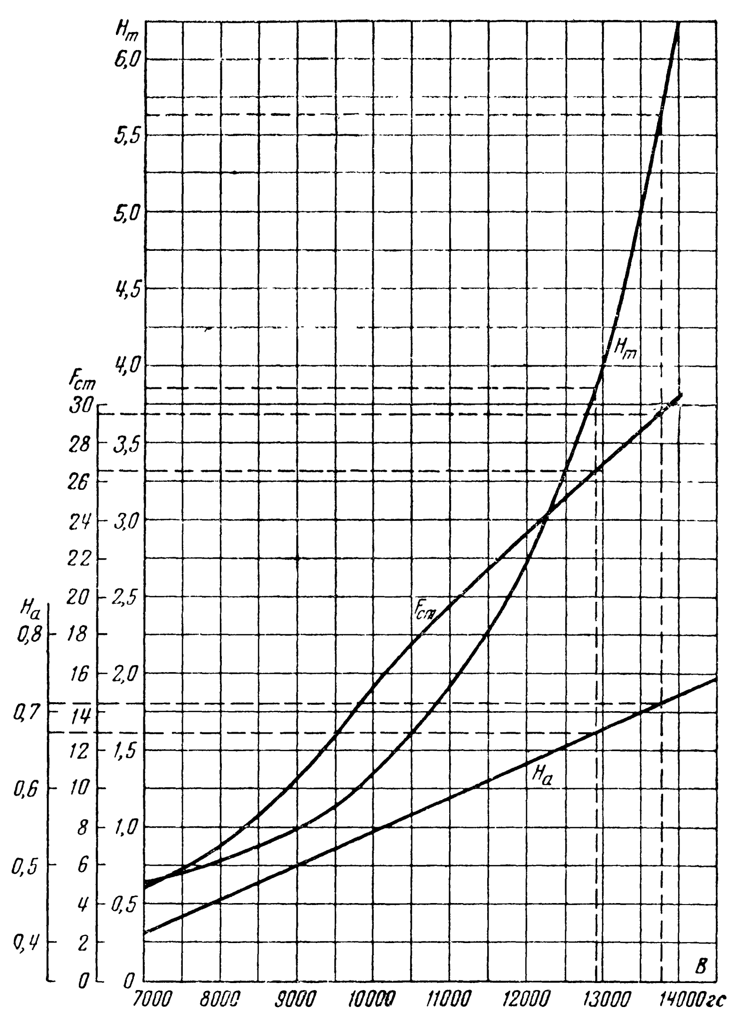


Рис. 103. Кривые намагничивания электротехнической стали марки Э42 толщиной 0,5 *мм* и зависимость н. с. на один стык от магнитной индукции.

H_m — кривая напряженности магнитного поля; $H_а$ — кривая активной составляющей напряженности; $F_{ст}$ — кривая намагничивающей силы на один стык у шихтованного магнитопровода.

Далее определяются значения составляющих $i_р$ и $i_а$ тока холостого хода, отнесенных к номинальному току для класса точности 0,5 (см. § 10):

$$i_р = \frac{F_m}{F_2 V}; \quad i_а = \frac{F_а}{F_2 V}. \qquad (30)$$

Погрешность напряжения f_{U0} и угловая погрешность δ_0 от тока холостого хода определяются по формулам (6) и (7).

Погрешность напряжения $f_{U н}$ и угловая погрешность $\delta_н$ от номинального тока нагрузки определяются по формулам (8) и (9).

Полная погрешность f_U и δ при номинальной нагрузке равна сумме погрешностей от тока холостого хода и от тока нагрузки, т. е.

$$f_U = f_{U0} + f_{Uн}; \qquad (31)$$

$$\delta = \delta_0 + \delta_н. \qquad (32)$$

Согласно требованиям ГОСТ необходимо также вычислить погрешности при нагрузке, составляющей $^1/_4$ номинальной (для класса точности 0,5).

Значения погрешностей для нагрузки, равной $^1/_4$ номинальной, и для номинальных нагрузок, соответствующих классам точности 1 и 3, находят, изменяя найденные выше значения $f_{Uн}$ и $\delta_н$ пропорционально нагрузке (§ 10).

Значения погрешностей напряжения f_U будут отрицательными (§ 10), и по расчету они могут выходить за пределы допусков для соответствующих классов точности. Для использования разрешаемых ГОСТ положительных допусков следует ввести коррекцию погрешности напряжения $f_{U к}$ (§ 11).

Значение коррекции $f_{Uк}$ выбирают численно равным среднему из крайних вычисленных значений f_U для класса точности 0,5, и это значение берут с положительным знаком. При введении этой коррекции погрешности напряжения будут определяться для обоих направлений (положительного и отрицательного) от нулевого значения.

Таким образом, окончательная погрешность напряжения f_U определится как алгебраическая сумма трех погрешностей — от тока холостого хода, от тока нагрузки и с введением коррекции:

$$f_U = f_{U0} + f_{Uн} + f_{Uк}.$$

Полученные результаты расчета сводятся в таблицу.

Правильно выполненный расчет будет являться таким, при котором вычисленные значения погрешностей не будут выходить за пределы допусков, указанных в табл. 14.

Таблица 14

Класс точности	Допуски на погрешности	
	напряжения, %	угловые, *мин*
0,5	±0,4	±15
1	±0,8	±30
3	±2,4	—

Указанные в табл. 14 пределы значений допусков сужены по сравнению с разрешаемыми ГОСТ ввиду возможных дополнительных производственных отклонений погрешностей относительно расчетных.

Расчет погрешностей трехфазного трехстержневого трансформатора напряжения производится на основании тех же данных, определяемых из его электромагнитного расчета, что и для однофазного трансформатора (длины средних линий магнитного потока $L_с$ и $L_я$, активные сечения стержня и ярма $Q_с$ и $Q_я$, размеры магнитопровода H, MO и h_1, а также активные и реактивные составляющие падения напряжения $U_а$, $U_{а1}$, $U_р$ и $U_{р1}$).

Ход расчета погрешностей трехфазного трансформатора, однако, несколько отличается от расчета однофазного трансформатора.

Длина средней линии магнитного потока в стержне $L_с$ принимается равной $L_с = H + h_1$, *см* (показано на рис. 102,*б*), а длина средней линии в ярме $L_я$ принимается равной (для фаз A и C)

$$L_я = 2MO + h_1 \frac{Q_с}{Q_я}\text{, } см,$$

где $Q_с$ и $Q_я$ — активные сечения стержня и ярма, *см*² (см. табл. 3);
MO — расстояние между осями стержней, *см* (табл. 3 и рис. 38,*в*);
h_1 — высота ярма, *см*.

Число стыков пластин на одну фазу для сечения стержня принимается равным $n_с = 1$ и для сечения ярма $n_я = 2$.

Намагничивающие силы и активные составляющие н. с. F_m и $F_а$ определяются по формулам (28) и (29), так же как и для однофазных трансформаторов.

Далее определяются условные значения отношений отдельных составляющих тока холостого хода к номинальному току $i_{р1}$, $i_{р2}$, $i_{а1}$ и $i_{а2}$. Эти значения, как и некоторые последующие формулы для расчета погрешностей холостого хода трехфазных трансформаторов напряжения, являются большей частью эмпирическими и поэтому приводятся без их вывода:

$$\left.\begin{aligned} i_{р1} &= \frac{F_m}{F_2 V}; \quad i_{а1} = \frac{F_а}{F_2 V}; \\ i_{р2} &= \frac{F_{mя}}{6F_2 V}; \quad i_{а2} = \frac{F_{ая}}{6F_2 V}, \end{aligned}\right\} \tag{33}$$

где $F_{mя} = H_{mя} L_я + n_я H_{ст.я}$ — намагничивающая сила в ярмах;
$F_{а.я} = H_{а.я} L_я$ — активная составляющая н. с. в ярмах.

Остальные обозначения, входящие в формулы (33), приведены выше при изложении хода расчета погрешностей однофазного броневого трансформатора напряжения.

Междуфазные погрешности от тока холостого хода f_{U0AB}, f_{U0BC} и f_{U0CA} по напряжению и δ_{0AB}, δ_{0BC} и δ_{0CA} по углу определяются формулами:

$$\left.\begin{aligned}
f_{U0AB} &= f_{U\mathrm{I}} - 3f_{U\mathrm{II}} - f_{U\mathrm{III}};\\
f_{U0BC} &= f_{U\mathrm{I}} - 3f_{U\mathrm{II}} + f_{U\mathrm{III}};\\
f_{U0CA} &= f_{U\mathrm{I}};\\
\delta_{0AB} &= \delta_{\mathrm{I}} - 3\delta_{\mathrm{II}} + \delta_{\mathrm{III}};\\
\delta_{0BC} &= \delta_{\mathrm{I}} - 3\delta_{\mathrm{II}} - \delta_{\mathrm{III}};\\
\delta_{0CA} &= \delta_{\mathrm{I}},
\end{aligned}\right\} \qquad (34)$$

где условные (вспомогательные) погрешности напряжения, обозначенные $f_{U\mathrm{I}}$, $f_{U\mathrm{II}}$ и $f_{U\mathrm{III}}$, и условные угловые погрешности δ_{I}, δ_{II} и δ_{III} определяются по следующим формулам:

$$\left.\begin{aligned}
f_{U\mathrm{I}} &= -(u_{а10} i_{а1} + u_{р10} i_{р1});\\
f_{U\mathrm{II}} &= -(u_{а10} i_{а2} + u_{р10} i_{р2});\\
f_{U\mathrm{III}} &= -\sqrt{3}(u_{а10} i_{р2} - u_{р10} i_{а2});\\
\delta_{\mathrm{I}} &= 34{,}4\,(u_{а10} i_{р1} - u_{р10} i_{а1});\\
\delta_{\mathrm{II}} &= 34{,}4\,(u_{а10} i_{р2} - u_{р10} i_{а2});\\
\delta_{\mathrm{III}} &= 59{,}5\,(u_{а10} i_{а2} + i_{р10} i_{р2}).
\end{aligned}\right\} \qquad (35)$$

Расчет погрешностей от тока нагрузки производится по формулам (5) и (6), как и для однофазных трансформаторов. Полные погрешности складываются из погрешностей от тока холостого хода и от тока нагрузки [см. формулы (28) и (29)].

Окончательные расчетные значения полных погрешностей будут получены, если к ним прибавить значения коррекции погрешности напряжения $U_к$ и угловой погрешности $\delta_к$ (§ 14). Число корректирующих витков определяется по формулам (8) и (9).

Вычисленные значения погрешностей сводятся в таблицу (см. далее пример расчета), причем отклонения этих значений от номинальных не должны выходить за пределы допусков, указанных в табл. 14.

Расчет погрешностей трехфазного пятистержневого трансформатора производится следующим образом: электромагнитный расчет такого трансформатора базируется на заранее предусмотренном значении индукции в стержнях, равном около 8 000 *гс*, т. е. в $\sqrt{3}$ раз меньшем, чем при расчете двухобмоточных трансформаторов напряжения. Это необходимо для того, чтобы при аварийном режиме, когда поток в стержнях исправных фаз увеличивается в $\sqrt{3}$ раз (§ 7), не происходило перенасыщения магнитопровода. По этой причине типовая мощность трехфазного пятистержневого трансформатора напряжения получается большей (примерно в 2 раза), чем трехфазного трехстержневого трансформатора.

Из электромагнитного расчета заимствуются те же данные, что и в предыдущих случаях.

Длина средней линии магнитного потока $L_с$ принимается равной

$$L_с = H + h_1,\ см,$$

а длина средней линии в основных ярмах $L_я$ принимается равной (для фаз A и C)

$$L_я = 2MO, \text{ см.}$$

Длина средней линии в дополнительных боковых ярмах (т. е. в крайних стержнях, не имеющих обмоток) $L_д$ принимается равной

$$L_д = H + MБ + 2h_1, \text{ см}$$

(значения H, MO, $MБ$ и h_1 — см. табл. 3 и рис. 38,г).

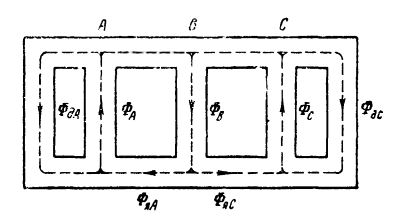


Рис. 104. Схема распределения магнитных потоков в трехфазном пятистержневом магнитопроводе.

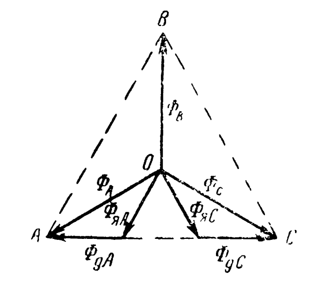


Рис. 105. Векторная диаграмма магнитных потоков трехфазного пятистержневого трансформатора.

Число стыков пластин (на одну фазу) принимается по сечению стержня $n_c = 1$ и по сечению ярма $n_я = 2$.

Расчет н. с. и их активных составляющих ввиду разветвления магнитных потоков фаз A и C несколько усложняется. На рис. 104 дано распределение магнитных потоков в стержнях и ярмах, а на рис. 105 приведена векторная диаграмма этих потоков.

Для дальнейшего хода расчета вводятся следующие обозначения магнитных потоков (подразумеваются их абсолютные значения):

$$Ф = Ф_A = Ф_B = Ф_C;$$

$$Ф_я = Ф_{яA} = Ф_{яC};$$

$$Ф_д = Ф_{дA} = Ф_{дC}.$$

Также вводятся следующие значения индукции:

$$B_c = \frac{Ф}{Q_c} \text{ (в стержнях);}$$

$$B_я = \frac{Ф_я}{Q_я} \text{ (в основных ярмах);}$$

$B_ф = B_c \dfrac{Q_c}{Q_я} = \dfrac{Ф}{Q_я}$ (фиктивная индукция, которая соответствовала бы сечению основных ярм при отсутствии дополнительных ярм).

Распределение магнитных потоков $\Phi_Д$ и $\Phi_С$ по основным и дополнительным ярмам зависит от величины коэффициента $k_я$, который находится по кривой рис. 106 в функции значения фиктивной индукции $B_ф$.

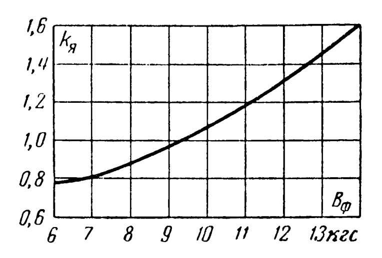


Рис. 106. Кривая для определения коэффициента $k_я$.

Индукция в основных ярмах $B_я$ определяется по формуле

$$B_я = \frac{\sqrt{f^2 + 2f + 4}}{2(1 + f)} B_ф,$$

где

$$f = \frac{L_я}{L_с} k_я.$$

Затем определяются намагничивающие силы и активные составляющие н. с. для стержней $F_{mс}$ и $F_{ас}$ и для ярм $F_{mя}$ и $F_{ая}$:

$$\left.\begin{aligned} F_{mс} &= H_{mс}L_с + n_с F_{ст.с}; \\ F_{а.с} &= H_{а.с}L_с; \\ F_{mя} &= H_{mя}L_я + n_я F_{ст.я}; \\ F_{а.я} &= H_{а.я}L_я. \end{aligned}\right\} \quad (36)$$

Далее определяются некоторые условные значения отношений намагничивающих и активных составляющих тока холостого хода к номинальному току $i_{р1}$, $i_{р2}$, $i_{а1}$ и $i_{а2}$:

$$\left.\begin{aligned} i_{р1} &= \frac{F_{m1}}{F_2 U}; \quad i_{р2} = \frac{F_{m2}}{6F_2 U}; \\ i_{а1} &= \frac{F_{а1}}{F_2 U}; \quad i_{а2} = \frac{F_{а2}}{6F_2 U}; \end{aligned}\right\} \quad (37)$$

Здесь

$$\left.\begin{aligned}
F_{m1} &= F_{mc} + \frac{2F_{m\text{я}}}{\sqrt{f^2+2f+4}};\\
F_{m2} &= F_{m\text{я}}\frac{2-f}{\sqrt{f^2+2f+4}};\\
F_{a1} &= F_{a.c} + \frac{2F_{a.\text{я}}}{\sqrt{f^2+2f+4}};\\
F_{a2} &= F_{a.\text{я}}\frac{2-f}{\sqrt{f^2+2f+4}}.
\end{aligned}\right\} \qquad (38)$$

Дальнейший ход расчета такой же, как и для трехстержневых трансформаторов. При этом для пятистержневых трансформаторов ввиду их низких магнитных нагрузок (малой индукции) обычно нет необходимости вводить коррекцию угловой погрешности $\delta_к$, так как расчетные значения последней сразу получаются в пределах класса точности 0,5.

Примеры расчета погрешностей

В качестве первого примера приводится ход расчета погрешностей однофазного двухобмоточного трансформатора напряжения типа НОМ-35 с коэффициентом трансформации 35 000/100 *в* и классом точности 0,5.

Согласно ГОСТ такой трансформатор имеет номинальные мощности 150, 250 и 600 *ва* для классов точности 0,5; 1 и 3 соответственно.

Ход расчета приводится для одного из предельных режимов работы трансформатора — при $V=1{,}1$, т. е. при наибольшем допустимом по ГОСТ значении первичного напряжения.

В результате произведенного электромагнитного расчета (предполагается, что таковой предварительно выполнен) магнитопровод выбран броневого типа, шихтованный из пластин электротехнической стали толщиной 0,5 *мм* марки Э42. Основные его размеры, указанные в графе 4 табл. 3, следующие:

$$H=365\ мм;\ МБ=305\ мм;\ h_1=34\ мм.$$

По этим данным определяются длины средних линий магнитного потока в стержне и ярме:

$$L_с=H=36{,}5\ см;\ L_я=H+МБ=2h_1=73{,}8\ см.$$

Число стыков пластин: $n_с=1$; $n_я=3$.

Значения индукции для режима $V=1{,}1$ будут:

для стержня $B_с=1{,}1\cdot 12\,500=13\,750$ *гс;*

для ярма $B_я=1{,}1\cdot 11\,700=12\,900$ *гс.*

Для этих значений индукций по кривым рис. 103 находятся соответствующие им значения напряженностей H_m, $H_{ст}$ и H_a.

Намагничивающие силы и активные составляющие н. с. будут равны [формулы (28) и (29)]:

$$F_m=5{,}62\cdot 36{,}5+3{,}85\cdot 73{,}8+1\cdot 31{,}5+3\cdot 28=604{,}5\ ав;$$

$$F_a=0{,}71\cdot 36{,}5+0{,}673\cdot 73{,}8=75{,}6\ ав.$$

Далее находятся кратности составляющих тока холостого хода i_m и $i_а$ [формулы (30)]:

$$i_m = \frac{604,5}{125 \cdot 1,1} = 4,4; \quad i_а = \frac{75,6}{125 \cdot 1,1} = 0,55,$$

где коэффициент $125 = 1,5 \cdot 83$ - н. с. при номинальном токе нагрузки (класс точности 0,5).

Полученные выше цифры позволяют перейти к непосредственному определению погрешностей трансформатора напряжения.

Предварительно из данных электромагнитного расчета необходимо выписать значения активных и реактивных падений напряжения: $u_{а1} = 0,127\%$; $u_{р1} = u_р/2 = 0,16\%$; $u_а = 0,278\%$; $u_р = 0,32\%$.

Погрешности от тока холостого хода [см. выражения (6) и (7)]

$$f_{U0} = -(0,127 \cdot 0,55 + 0,16 \cdot 4,4) = -0,77\%;$$

$$\delta_0 = 34,4\,(0,127 \cdot 4,4 - 0,16 \cdot 0,55) = 16,1'.$$

Погрешности от номинального тока нагрузки (класс 0,5) определяются по формулам (8) и (9):

$$f_{Uн} = -(0,278 \cdot 0,8 + 0,32 \cdot 0,6) = -0,414\%;$$

$$\delta_н = 34,4\,(0,278 \cdot 0,6 - 0,32 \cdot 0,8) = -3,06'.$$

Полные погрешности при номинальной нагрузке (класс 0,5) определяются по формулам (31) и (32):

$$f_U = -0,77 - 0,414 = -1,184\%;$$

$$\delta = 16,1 - 3,06 = 13,04'.$$

Полные погрешности при $^1/_4$ номинальной нагрузки:

$$f_{U^1/_4} = -0,77 - \frac{1}{4} \cdot 0,414 = -0,874\%;$$

$$\delta_{^1/_4} = 16,1 - \frac{1}{4} \cdot 3,06 = 15,3'.$$

Полные погрешности при нагрузке, соответствующей классу точности 1,

$$f_{U1} = -0,77 - \frac{250}{150} \cdot 0,414 = -1,46\%;$$

$$\delta_1 = 16,1 - \frac{250}{150} \cdot 3,06 = 11'.$$

Полные погрешности при нагрузке, соответствующей классу точности 3,

$$f_{U3} = -0,77 - \frac{600}{150} \cdot 0,414 = -2,43\%;$$

$$\delta_3 = 16,1 - \frac{600}{150} \cdot 3,06 = 3,9'.$$

Аналогичным образом подсчитанные погрешности для режима $V = 0,9$ будут иметь значения:

$$f_{U^1/_4} = -0,57\%; \quad \delta_{1/_4} = 6,7';$$
$$f_U = -0,88\%; \quad \delta = 4,4';$$
$$f_{U1} = -1,15\%; \quad \delta_1 = 2,3';$$
$$f_{U3} = -2,1\%; \quad \delta_3 = -4,9'.$$

Погрешности напряжения $f_{U^1/_4}$ и f_U, полученные для $V = 0,9$ и $V = 1,1$, выходят за пределы допустимых значений для класса точности 0,5. Поскольку все они получились с отрицательным знаком, то имеется возможность удовлетворить классу точности 0,5, если ввести коррекцию витков $f_{U\text{к}}$.

Величина коррекции определяется, как было сказано выше, средним (между крайними) значением погрешности, взятым с положительным знаком, т. е.

$$f_{U\text{к}} = \frac{1,184 + 0,57}{2} = 0,877\%.$$

Примем $f_{U\text{к}} = 0,8$; при этом число витков первичной обмотки должно быть уменьшено на $\frac{0,8}{200} \cdot 29\,050 \approx 230$ витков и должно быть равным $29\,050 - 230 = 28\,820$ витков.

Таким образом, после введения коррекции получим следующие окончательные расчетные значения погрешностей (табл. 15):

Таблица 15

Класс точности	Нагрузка в долях номинальной	Погрешности			
		напряжения, %		угловая, *мин*	
		$V=0,9$	$V=1,1$	$V=0,9$	$V=1,1$
0,5	0,25	0,23	—0,07	6,7	15,3
0,5	1	—0,08	—0,38	4,4	13
1	1	—0,35	—0,66	2,3	11
3	1	—1,3	—1,63	—4,9	3,9

Поскольку определенные расчетом погрешности, приведенные в табл. 15, не выходят за пределы допусков, расчет погрешностей может считаться вполне законченным.

В табл. 16 приведены средние значения погрешностей трансформатора напряжения типа НОМ-35, полученные при типовых испытаниях.

Ход расчета погрешностей трехфазного двухобмоточного трансформатора напряжения приводится на примере трансформатора

Класс точности	Нагрузка в долях номинальной	Погрешности			
		напряжения, %		угловая, *мин*	
		$V=0,9$	$V=1,1$	$V=0,9$	$V=1,1$
0,5	0,25	+0,09	—0,1	+4,8	+10,6
0,5	1	—0,22	—0,42	+3,3	+9,1
1	1	—0,5	—0,7	+1,2	+7
3	1	—1,46	—1,66	—5,8	0

типа НТМК-10 с коэффициентом трансформации 10 000/100 *в*, схемой соединения Y/Y_0-12 и классом точности 0,5.

Согласно ГОСТ номинальные мощности этого трансформатора равны 120, 200 и 480 *ва* (соответственно классам точности 0,5, 1 и 3).

Подробный ход расчета, так же как и для однофазного трансформатора, приводится для одного из предельных режимов работы трансформатора при $V=1,1$.

Основные размеры магнитопровода указаны в графе 13 табл. 3:

$$H=180 \text{ мм};\ MO=160 \text{ мм и } h_1=56 \text{ мм}.$$

Активные сечения стержня и ярма

$$Q_с=28,5 \text{ см}^2 \text{ и } Q_я=31,5 \text{ см}^2.$$

Длины средних линий $L_с$ и $L_я$ будут равны:

$$L_с=H+h_1=18+5,6=23,6 \text{ см};$$

$$L_я=2\,MO+h_1\frac{Q_с}{Q_я}=2\cdot 16+5,6\cdot\frac{28,5}{31,5}=37,1 \text{ см}.$$

Далее, пользуясь кривыми рис. 103, определяются намагничивающие силы и активные составляющие н. с. [формулы (28) и (29)] для значений индукции $B_с=13\,400$ и $B_я=12\,150$, соответствующих $V=1,1$,

$$F_m=H_{mс}L_с+H_{mя}L_я+n_сF_{ст.с}+n_яF_{ст.я}=4,75\cdot 23,6+2,9\cdot 37,1+$$
$$+1\cdot 28,2+2\cdot 23,8=295,4;$$
$$F_а=H_{а.с}L_с+H_{а.я}L_я=0,695\cdot 23,6+0,64\cdot 37,1=40,1.$$

Затем определяются отношения реактивных и активных составляющих тока холостого хода к номинальному току по формулам (33):

$$i_{р1}=\frac{F_m}{F_2V}=\frac{295,4}{52\cdot 1,1}=5,16;$$

$$i_{р2}=\frac{F_{mя}}{6F_2V}=\frac{155,2}{6\cdot 52\cdot 1,1}=0,451;$$

$$i_{а1}=\frac{F_а}{F_2V}=\frac{40,1}{52\cdot 1,1}=0,7;$$

$$i_{а2}=\frac{F_{а.я}}{6F_2V}=\frac{23,7}{6\cdot 52\cdot 1,1}=0,069.$$

Активные и реактивные падения напряжения от тока холостого хода и от тока нагрузки согласно электромагнитному расчету составляют $u_{a10} = 0,212$; $u_{p10} = 0,056$; $u_a = 0,367$; $u_p = 0,112$.

Отсюда вспомогательные значения погрешностей по формулам (35) будут равны:

$$f_{UI} = -(u_{a10}i_{a1} + u_{p10}i_{p1}) = -(0,212\cdot 0,7 + 0,056\cdot 5,16) = -0,437\%;$$

$$f_{UII} = -(u_{a10}i_{a2} + u_{p10}i_{p2}) = -(0,212\cdot 0,069 + 0,056\cdot 0,415) = 0,04\%;$$

$$f_{UIII} = -\sqrt{3}\,(u_{a10}i_{p2} - u_{p10}i_{a2}) =$$

$$= -\sqrt{3}(0,212\cdot 0,451 - 0,056\cdot 0,069) = -0,16\%;$$

$$\delta_I = 34,4\,(u_{a10}i_{p1} - u_{p10}i_{a1}) = 34,4\,(0,212\cdot 5,16 - 0,056\cdot 0,7) = 36,2';$$

$$\delta_{II} = 34,4\,(u_{a10}i_{p2} - u_{p10}i_{a2}) = 34,4\,(0,212\cdot 0,451 - 0,056\cdot 0,069) = 3,2';$$

$$\delta_{III} = 59,5\,(u_{a10}i_{a2} - u_{p10}i_{p2}) = 59,5\,(0,212\cdot 0,069 + 0,056\cdot 0,451) = 2,4'.$$

По этим значениям и по формулам (34) находятся междуфазные погрешности от тока холостого хода:

$$f_{U0AB} = f_{UI} - 3f_{UII} - f_{UIII} = -0,437 + 3\cdot 0,04 + 0,16 = -0,157\%;$$

$$f_{U0BC} = f_{UI} - 3f_{UII} + f_{UIII} = -0,437 + 3\cdot 0,04 - 0,16 = -0,477\%;$$

$$f_{U0CA} = f_{UI} = -0,437\%;$$

$$\delta_{0AB} = \delta_I - 3\delta_{II} + \delta_{III} = 36,2 - 3\cdot 3,2 + 2,4 = 29';$$

$$\delta_{0BC} = \delta_I - 3\delta_{II} - \delta_{III} = 36,2 - 3\cdot 3,2 - 2,4 = 24,2';$$

$$\delta_{0CA} = \delta_I = 36,2'.$$

Погрешности от тока нагрузки, определяемые по формулам (8) и (9),

$$f_{U\text{н}} = -(u_a \cos\varphi_2 + u_p \sin\varphi_2) =$$

$$= -(0,367\cdot 0,8 + 0,112\cdot 0,6) = -0,361\%;$$

$$\delta_{\text{н}} = 34,4\,(u_a \sin\varphi_2 - u_p \cos\varphi_2) =$$

$$= 34,4\,(0,367\cdot 0,6 - 0,112\cdot 0,8) = 4,5'.$$

Полные погрешности при номинальной нагрузке (для класса 0,5) согласно формулам (31) и (32) будут равны:

$$f_{UAB} = f_{U0AB} + f_{U\text{н}} = -0,157 - 0,361 = -0,518\%;$$

$$f_{UBC} = f_{U0BC} + f_{U\text{н}} = -0,477 - 0,361 = -0,838\%;$$

$$f_{UCA} = f_{U0CA} + f_{U\text{н}} = -0,437 - 0,361 = -0,798\%;$$

$$\delta_{AB} = \delta_{0AB} + \delta_{н} = 29 + 4,5 = 33,5';$$

$$\delta_{BC} = \delta_{0BC} + \delta_{н} = 24,2 + 4,5 = 28,7';$$

$$\delta_{CA} = \delta_{0CA} + \delta_{н} = 36,2 + 4,5 = 40,7'.$$

Полные погрешности при $^1/_4$ номинальной нагрузки равны:

$$f_{UAB} = f_{U0AB} + {}^1/_4 f_{Uн} = -0,157 - 0,09 = -0,247\%;$$

$$f_{UBC} = f_{U0BC} + {}^1/_4 f_{Uн} = -0,477 - 0,09 = -0,567\%;$$

$$f_{UCA} = f_{U0CA} + {}^1/_4 f_{Uн} = -0,793 - 0,09 = -0,708\%;$$

$$\delta_{AB} = \delta_{0AB} + {}^1/_4 \delta_{н} = 29 + 1,1 = 30,1'.$$

$$\delta_{BC} = \delta_{0BC} + {}^1/_4 \delta_{н} = 24,2 + 1,1 = 25,3';$$

$$\delta_{CA} = \delta_{0CA} + {}^1/_4 \delta_{н} = 36,2 + 1,1 = 37,3'.$$

Подсчитанные аналогичным образом полные погрешности при 0,9 номинального напряжения ($V = 0,9$) и номинальной и $^1/_4$ номинальной нагрузках дают следующие значения (в скобках указаны данные расчета для $^1/_4$ номинальной нагрузки):

$$f_{UAB} = -0,689\% \; (-0,418\%);$$

$$f_{UBC} = -0,392\% \; (-0,121\%);$$

$$f_{UCA} = -0,459\% \; (-0,188\%);$$

$$\delta_{AB} = 21,9' \; (18,5');$$

$$\delta_{BC} = 18,3' \; (14,9');$$

$$\delta_{CA} = 25,8' \; (22,4').$$

Крайними значениями погрешностей для обоих режимов $V = 1,1$ и $V = 0,9$ являются:

для погрешности напряжения —0,838% и —0,121%;

для угловой погрешности +40,7′ и +14,9′.

Средними из этих значений являются погрешности —0,48% и 27,8′. Эти цифры, взятые с обратными знаками, и должны быть приняты для определения корректирующих витков $w_к$ и w_δ (§ 11).

В заводском расчете трансформатора напряжения типа НТМК-10 коррекция напряжения принята равной $f_{Uк} = +0,51\%$ и угловая коррекция $\delta_к = -30,2$.

Тогда по формулам (11) и (12) число корректирующих витков получается:

$$w_\delta = 0,336\delta_к w \cdot 10^{-3} = 0,336 \cdot 30,2 \cdot 7\,500 \cdot 10^{-3} = 76 \text{ витков};$$

$$w_к = w \frac{f_{Uк}}{100} + \frac{1}{2} w_\delta = 7\,500 \cdot \frac{0,51}{100} + \frac{1}{2} \cdot 76 = 76 \text{ витков}.$$

Это значит, что основная ветвь (большее плечо в схеме зигзага) первичной обмотки должна иметь 7 500—76=7 424 витка, а компенсационная обмотка—76 витков (графа 4, табл. 6).

Поскольку требуется отрицательная угловая коррекция, то первичная обмотка должна быть соединена по схеме рис. 21,*в*.

Таким образом, определив погрешности также и при нагрузках, соответствующих классам точности 1 и 3, и введя вычисленные выше коррекции погрешностей, получают окончательные расчетные значения погрешностей трансформатора напряжения, которые сведены в табл. 17.

Таблица 17

Класс точности	Нагрузка в долях номинальной	Погрешность напряжения, %					
		$V=0,9$			$V=1,1$		
		Фазы			Фазы		
		А—В	*В—С*	*С—А*	*А—В*	*В—С*	*С—А*
0,5	0,25	+0,09	+0,39	+0,32	+0,26	—0,06	—0,20
0,5	1	—0,18	+0,12	+0,05	—0,01	—0,33	—0,29
1	1	—0,42	—0,12	—0,19	—0,25	—0,57	—0,53
3	1	—1,26	—0,96	—1,03	—1,09	—1,41	—1,37
		Угловая погрешность, *мин*					
0,5	0,25	—11,7	—15,3	—7,8	—0,1	—4,9	+7,1
0,5	1	—8,3	—11,9	—4,4	+3,3	—1,5	+10,5
1	1	—5,3	—8,9	—1,4	+6,3	+1,5	+13,5
3	1	+5,2	+1,6	+9,1	+16,8	+12,0	+24,0

Так же как и в примере для однофазного трансформатора, эти расчетные значения не должны выходить за пределы допусков, указанных в табл. 14.

В качестве примера расчета погрешностей трехфазного трехобмоточного пятистержневого трансформатора напряжения может служить расчет погрешностей трансформатора типа НТМИ-18 напряжением 18 000/100/100 : 3 со схемой соединения V/V-12 и классом точности 0,5.

Номинальные мощности этого трансформатора составляют 120, 200 и 480 *ва*.

Основные размеры магнитопровода указаны в графе 16 табл. 3:

$$H=275\ мм;\ MO=195\ мм;\ MБ=228\ мм\ и\ h=52\ мм.$$

Активные сечения стержня и ярма

$$Q_с=29,3\ см^2\ и\ Q_я=29,1\ см^2.$$

Длины средних магнитных линий $L_с$, $L_я$ и $L_д$ будут равны:

$$L_с=H+h_1=27,5+5,2=32,7\ см;$$

$$L_я=2MO=2\cdot 19,5=39\ см;$$

$$L_д=H+MБ+2h_1=27,7+22,8+2\cdot 5,2=60,7\ см.$$

Далее, из электромагнитного расчета заимствуются значения индукции $B_с$ и $B_ф$ (в данном примере приводятся только для напряжения $V = 1{,}1$):

$$B_с = 8\,500 \text{ гс};$$

$$B_ф = 8\,550 \text{ гс}.$$

Индукция в основных ярмах будет:

$$B_я = \frac{\sqrt{f^2 + 2f + 4}}{2(1 + f)} B_ф = 0{,}65 \cdot 8\,550 = 5\,600 \text{ гс},$$

где $f = \frac{L_я}{L_с} k_я = \frac{39}{32{,}7} \cdot 0{,}92 = 1{,}1;$

$k_я = 0{,}92$ берется по кривой рис. 106.

По найденным значениям индукции и по данным кривых рис. 103, пользуясь формулами (33), определяются намагничивающие силы и активные составляющие н. с.:

$$F_{mс} = 0{,}9 \cdot 32{,}7 + 1 \cdot 8{,}5 = 37{,}9;$$

$$F_{а.с} = 0{,}48 \cdot 32{,}7 = 15{,}7;$$

$$F_{mя} = 0{,}5 \cdot 39 + 2 \cdot 3 = 25{,}5;$$

$$F_{а.я} = 0{,}35 \cdot 39 = 13{,}6.$$

Затем по формулам (38) определяются условные значения:

$$F_{m1} = 37{,}9 + \frac{2 \cdot 25{,}5}{2{,}72} = 56{,}6;$$

$$F_{m2} = 25{,}5 \cdot \frac{2 - 1{,}1}{2{,}72} = 8{,}4;$$

$$F_{а1} = 15{,}7 + \frac{2 \cdot 13{,}6}{2{,}72} = 25{,}7;$$

$$F_{а2} = 13{,}6 \cdot \frac{2 - 1{,}1}{2{,}72} = 4{,}5$$

и с помощью этих значений по формулам (37) определяются отношения составляющих тока холостого хода к номинальному току:

$$i_{р1} = \frac{56{,}6}{80{,}5 \cdot 1{,}1} = 0{,}64;$$

$$i_{р2} = \frac{8{,}4}{6 \cdot 80{,}5 \cdot 1{,}1} = 0{,}016;$$

$$i_{а1} = \frac{25{,}7}{80{,}5 \cdot 1{,}1} = 0{,}29;$$

$$i_{а2} = \frac{4{,}5}{6 \cdot 80{,}5 \cdot 1{,}1} = 0{,}0085.$$

Далее, по заимствованным из электромагнитного расчета значениям падений напряжения $u_{a10} = 0{,}223$; $u_{p10} = 0{,}158$; $u_a = 0{,}431$ и $u_p = 0{,}315$ приступают к определению погрешностей.

Вспомогательные значения погрешностей будут равны [формулы (35)]:

$$f_{UI} = -(0{,}223 \cdot 0{,}29 + 0{,}158 \cdot 0{,}64) = -0{,}166;$$

$$f_{UII} = -(0{,}223 \cdot 0{,}0085 + 0{,}158 \cdot 0{,}016) = -0{,}0044;$$

$$f_{UIII} = -\sqrt{3}\,(0{,}223 \cdot 0{,}016 - 0{,}158 \cdot 0{,}0085) = -0{,}0039;$$

$$\delta_I = 34{,}4\,(0{,}223 \cdot 0{,}64 - 0{,}158 \cdot 0{,}29) = 3{,}3;$$

$$\delta_{II} = 34{,}4\,(0{,}223 \cdot 0{,}016 - 0{,}158 \cdot 0{,}0085) = 0{,}1;$$

$$\delta_{III} = 59{,}5\,(0{,}223 \cdot 0{,}0085 + 0{,}158 \cdot 0{,}016) = 0{,}26.$$

По этим значениям определяются междуфазные погрешности от тока холостого хода [формулы (34)]:

$$f_{U0AB} = -0{,}166 + 3 \cdot 0{,}0044 + 0{,}0039 = -0{,}149\%;$$

$$f_{U0BC} = -0{,}166 + 3 \cdot 0{,}0044 - 0{,}0039 = -0{,}157\%;$$

$$f_{U0CA} = -0{,}166\%;$$

$$\delta_{0AB} = 3{,}3 - 3 \cdot 0{,}1 + 0{,}26 = 3{,}26';$$

$$\delta_{0BC} = 3{,}3 - 3 \cdot 0{,}1 - 0{,}26 = 2{,}74';$$

$$\delta_{0CA} = 3{,}3'.$$

Погрешности от номинального тока нагрузки:

$$f_{U\text{н}} = -(0{,}431 \cdot 0{,}8 + 0{,}315 \cdot 0{,}6) = -0{,}534\%;$$

$$\delta_\text{н} = 34{,}4\,(0{,}431 \cdot 0{,}6 - 0{,}315 \cdot 0{,}8) = 0{,}24'.$$

Полные погрешности от номинального тока нагрузки (для класса 0,5):

$$f_{UAB} = -0{,}149 - 0{,}534 = -0{,}683\%;$$

$$f_{UBC} = -0{,}157 - 0{,}534 = -0{,}691\%;$$

$$f_{UCA} = -0{,}166 - 0{,}534 = -0{,}7\%;$$

$$\delta_{AB} = 3{,}26 + 0{,}24 = 3{,}5';$$

$$\delta_{BC} = 2{,}74 + 0{,}24 = 3';$$

$$\delta_{CA} = 3{,}3 + 0{,}24 = 3{,}54'.$$

Полные погрешности при $^1/_4$ номинального тока нагрузки:

$$f_{UAB} = -0{,}149 - 0{,}133 = -0{,}282\%;$$

$$f_{UBC} = -0{,}157 - 0{,}133 = -0{,}29\%;$$

$$f_{UCA} = -0{,}166 - 0{,}133 = -0{,}3\%;$$

$$\delta_{AB} = 3{,}26 + 0{,}06 = 3{,}32';$$

$$\delta_{BC} = 2{,}74 + 0{,}06 = 2{,}8';$$

$$\delta_{CA} = 3{,}3 + 0{,}06 = 3{,}36'.$$

Подсчитанные аналогичным образом полные погрешности при напряжении $V = 0{,}9$ дают следующие значения (в скобках указаны погрешности при $^1/_4$ номинальной нагрузки):

$$f_{UAB} = -0{,}666\% \ (-0{,}265\%);$$

$$f_{UBC} = -0{,}674\% \ (-0{,}273\%);$$

$$f_{UCA} = -0{,}686\% \ (-0{,}286\%);$$

$$\delta_{AB} = 2{,}57 \ (2{,}39');$$

$$\delta_{BC} = 1{,}91 \ (1{,}73');$$

$$\delta_{CA} = 2{,}48 \ (2{,}3').$$

Крайними значениями погрешностей напряжения, вычисленными для обоих режимов $V=1{,}1$ и $V=0{,}9$, являются —0,7% и —0,295%. Среднее из этих значений, взятое с обратным знаком (+0,48%), должно быть принято в качестве коррекции напряжения. Введения угловой коррекции не требуется ввиду малых абсолютных значений угловой погрешности.

В заводском расчете трансформатора напряжения типа НТМИ-18, 18 000/100 *в* принята коррекция напряжения, равная +0,45%, т. е. общее теоретическое число витков обмотки ВН 20 880, соответствующее коэффициенту трансформации,

$$116 \cdot \frac{18\,000}{100} = 20\,880$$

должно быть уменьшено на $\frac{0{,}45}{100} \cdot 20\,880 = 94$ витка, и фактическое число витков обмотки ВН должно быть равным $20\,880 - 94 = 20\,786$, которое и указано в табл. 6.

В заключение должны быть определены также полные погрешности для нагрузок, соответствующих классам точности 1 и 3; после введения коррекции напряжения окончательные результаты вычислений сводятся в табл. 18.

Таблица 18

Класс точности	Нагрузка в долях номинальной	Погрешность напряжения, %					
		$V=0,9$			$V=1,1$		
		Фазы			Фазы		
		A—B	*B—C*	*C—A*	*A—B*	*B—C*	*C—A*
0,5	0,25	+0,185	+0,177	+0,164	+0,168	+0,16	+0,15
0,5	1	—0,216	—0,224	—0,236	—0,233	—0,24	—0,25
1	1	—0,572	—0,58	—0,592	—0,589	—0,597	—0,606
3	1	—1,818	—1,826	—1,838	—1,835	—1,843	—1,852
		Угловая погрешность, *мин*					
0,5	0,25	2,4	1,7	2,3	3,3	2,8	3,4
0,5	1	2,6	1,9	2,5	3,5	3,0	3,5
1	1	2,7	2,1	2,6	3,7	3,1	3,7
3	1	3,3	2,6	3,2	4,2	3,7	4,3

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ПЕРЕЧЕНЬ ВВОДОВ ДЛЯ МАСЛЯНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ[1]

Напряжение, *кв*	Тип трансформатора напряжения	№ чертежа ввода и № рисунка, приводимого в книге	Каталожный № фарфорового изолятора[2]	Способ монтажа ввода	Установка	Вес, *кг*
0,5	НОМ-6 НОМ-10 НОМ-15 НТМК-6-48 НТМК-10 НТМИ-6 НТМИ-10	М5-67323, рис. 52	1046Г	Составной	Внутренняя	0,17
0,5	НОМ-35 ЗНОМ-15 ЗНОМ-20 ЗНОМ-35-54 НТМИ-18 НКФ-110-57 НКФ-110-58 НКФ-220-58 НКФ-330 НКФ-500	5БТ-516-100, рис. 53	СБ-0509к, СБ-0406к и СБ-0408к	Составной съемный	Наружная	0,242

[1] Все вводы разработаны на Электрозаводе.
[2] Фарфоровые изоляторы разработаны заводом „Изолятор“.

Продолжение прилож. 2

Напряжение, *кв*	Тип трансформатора напряжения	№ чертежа ввода и № рисунка, приводимого в книге	Каталожный № фарфорового изолятора	Способ монтажа ввода	Установка	Вес, *кг*
1 (для вводов Э и КР)	НКФ-220-58 НКФ-330 НКФ-400 НКФ-500	5БТ-516-200, рис. 54	СБ-0491к и СБ-0489к	Составной съемный	Наружная	0,76
1	НКФ-400	М5-8163, рис. 55	3070 и 3109	Составной	Внутренняя	0,7
6	НОМ-6 НТМК-6-48 НТМИ-6	М5-67322, рис. 56	1958	Армированный	Внутренняя	0,32
10	НОМ-10 НТМК-10 НТМИ-10	М5-51223, рис. 57	4251	Армированный	Внутренняя	1,88
15	НОМ-15 НТМИ-18	С5-69614, рис. 58	1371	Армированный	Внутренняя	4,32
15	ЗНОМ-15	С5-167732, рис. 59	СБ-0292к	Механическое крепление	Наружная	2,68

Продолжение прилож. 2

Напряжение, *кв*	Тип трансформатора напряжения	№ чертежа ввода и № рисунка, приводимого в книге	Каталожный № фарфорового изолятора	Способ монтажа ввода	Установка	Вес, *кг*
20	ЗНОМ-20	С5-151029, рис. 60	СБ-0516к	Механическое крепление	Наружная	9,4
35	НОМ-35	С5-54710, рис. 61	2031	Армированный	Наружная	19,7
35	ЗНОМ-35-54	С5-81856, рис. 62	2031	Армированный	Наружная	31,5
110	НКФ-110-57 НКФ-110-58 НКФ-220-58 НКФ-330	М5-135960, рис. 63	6025	Механическое крепление	Наружная	180
110	НКФ-400 НКФ-500	М5-115415, рис. 64	4178/1	Механическое крепление	Наружная	370

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

ПЕРЕЧЕНЬ ГОСУДАРСТВЕННЫХ СТАНДАРТОВ И ТЕХНИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ИЗОЛЯЦИОННЫЕ ДЕТАЛИ И МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Наименование детали или материала	№ ГОСТ или технических условий
Цилиндры и трубки бумажно-бакелитовые	ВТУЭ 104-41
Картон электроизоляционный марки ЭВ То же марки ЭМЦ	ГОСТ 2824-56 ГОСТ 4194-58
Бумага кабельная	ГОСТ 645-41
Бумага телефонная	ГОСТ 3553-47
Лакоткань	ГОСТ 2214-46
Трубки электроизоляционные (линоксиновые)	ТУК ОММ.505.236.56
Трубки хлорвиниловые	ВТУ МЭП 727-50
Гетинакс электротехнический	ГОСТ 2718-54
Пластики древесные слоистые	ГОСТ 8697-58
Лента изоляционная хлопчатобумажная, киперная и тафтяная	ГОСТ 4514-48
Шнур (чулок) хлопчатобумажный	ТУ МЛП 1387-47

ЛИТЕРАТУРА

1. Городецкий С. С., Измерения на высоком напряжении, ГЭИ, 1934.

2. Каталог на трансформаторы напряжения, ЦБТИ МЭП, 1948.

3. Каталог № 2341, Трансформаторы напряжения, ЦИНТИ, 1961.

4. ГОСТ 1983-43, Трансформаторы напряжения.

5. Дымков А. М. и Фингерит Ш. Е., Трансформатор напряжения типа НКФ-400, «Вестник электропромышленности», 1957, № 3.

6. Дымков А. М. и Фингерит Ш. Е., Емкостный трансформатор напряжения НДЕ-400, «Вестник электропромышленности», 1959, № 9.

7. Козлов Ю. А., Поляков А. Л., Соколова С. Л., Применение литой изоляции на основе компаунда МБК-1 для измерительных трансформаторов напряжения, «Вестник электропромышленности», 1960, № 2.

8. Каганович Е. А., Испытание трансформаторов малой и средней мощности, Госэнергоиздат, серия «Трансформаторы», вып. 2, 1959.

9. Алексенко Г. В., Ашрятов А. К., Фрид Е. С., Испытания мощных и высоковольтных трансформаторов, Госэнергоиздат, 1963.

10. Михайлов В. В., Расчет и конструирование высоковольтной аппаратуры, Госэнергоиздат, 1955.

СОДЕРЖАНИЕ